Il ponte sullo Stretto

Sta per realizzarsi il sogno millenario di congiungere le sponde dello Stretto di Messina: l'iter per l'approvazione del progetto di quello che, per lunghezza della campata centrale, sarà il primo ponte sospeso del mondo è ormai prossimo alla conclusione

di Aurelio S. Misiti

Da oltre duemila anni i popoli dell'Italia e della Sicilia aspirano a collegare l'isola alla terraferma, assecondando l'esigenza quasi primordiale di porre rimedio alla frattura ricongiungendo le mitiche sponde, tra cui scorrono le pericolose correnti che hanno suggerito a Omero la descrizione invero drammatica delle insidie contrapposte tra Scilla e Cariddi.

Sono celebri i vari tentativi dei Romani durante le guerre puniche di costruire ponti di barche per l'attraversamento degli eserciti e degli animali al seguito. Ma anche le cronache inglesi del XIII secolo tramandano interessanti notizie per la storia delle due sponde. E non solo perché parlando dello Stretto lo indicano come un grande fiume che divide Sicilia e Calabria (così le *Chronicles of the Reigns of Stephen, Henry II and Richard I* e la *Historia Anglorum* di Matteo Paris), ma soprattutto perché ricordano il disegno della costruzione di un ponte.

Riferisce Giovanni di Salisbury - personaggio di spicco, a lungo frequentatore della corte normanna - che Ruggero II, una volta divenuto re di Sicilia nel 1140, aveva fatto compiere attente esplorazioni nello Stretto da un palombaro, per osservare le correnti, i cui vortici e le cui insidie avevano originato personaggi immortalati dalla mitologia e dalla poesia.

Egli stesso riporta minuziosamente quanto avevano già scritto Benedetto di Sant'Andrea nella sua *Cronaca* e Guglielmo di Puglia nel poema su Roberto il Guiscardo: si tratta del progetto di realizzare un ponte tra le due sponde ideato dall'imperatore Carlo Magno nel IX secolo e poi ripreso a metà dell'XI da Roberto il Guiscardo, il prode Altavilla che con il fratello Ruggero realizzò la conquista dei Normanni nel Mezzogiorno d'Italia.

Quando l'imperatore franco giunse in Calabria e fu sullo Stretto, rilevata l'esiguità della distanza tra le due sponde, avrebbe deciso di realizzare una sequenza di ponti sul mare, a cui avrebbero dovuto contribuire Franchi e Sassoni, Avari e Alemanni, Bavari e Longobardi: come dire, tutte le genti d'Europa.

Quel disegno, sgretolatosi con la morte di Carlo Magno e con la disgregazione dell'Europa nascente, fu accarezzato dal Guiscardo, che, secondo Guglielmo Appulo, ne avrebbe iniziata la costruzione, anch'essa sospesa dopo che, colpito da dissenteria, l'Altavilla morì sulle sponde dalmate nel 1085.

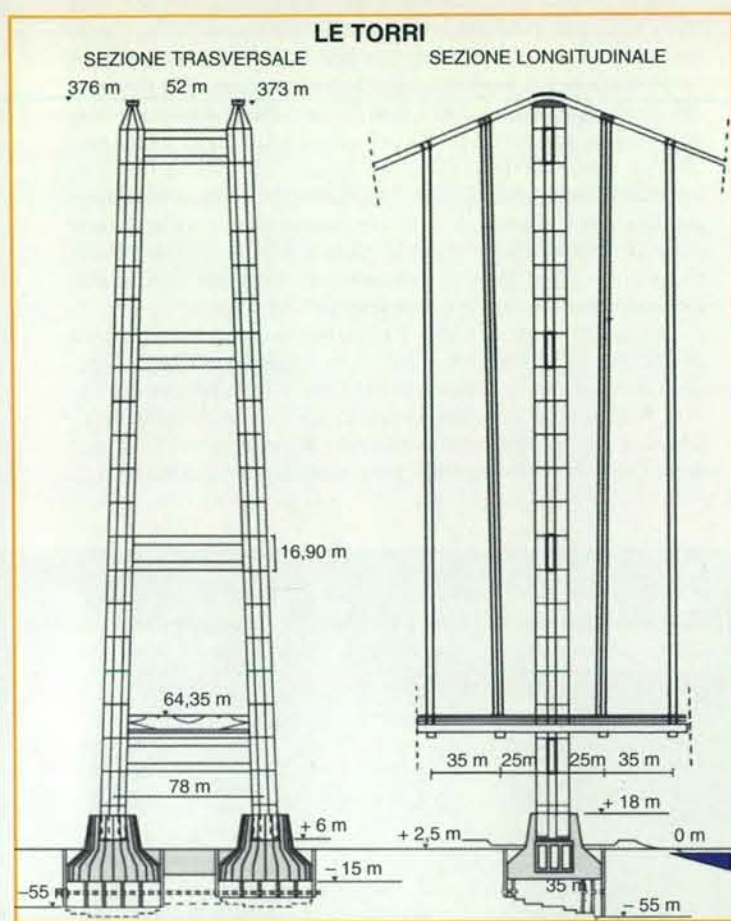
Il sogno di Franchi e Normanni rimase sempre vivo nelle genti delle due sponde che si sono guardate, frequentate e amalgamate, nonostante l'insidia dei flutti turbinosi.

Dal concorso al progetto

La storia recente del tentativo di congiungere Italia e Sicilia risale a una trentina d'anni fa. Il collegamento, infatti, presenta un aspetto di concreta fattibilità con il «Concorso internazionale di idee», bandito nel 1969 dall'ANAS in collaborazione con l'Amministrazione delle Ferrovie dello Stato, al quale parteciparono 143 concorrenti. Tra questi furono prescelti 12 progetti relativi a nove tipologie aeree, due alvee e una subalvea.

Di lì in poi, la questione è di competenza politica. Nel 1971 la Legge 1158 afferma il prevalente interesse nazionale dell'opera e pone le basi per la creazione di una società concessionaria per la progettazione, la realizzazione e la gestione del ponte. Dieci anni dopo, con le modalità e finalità volute dalla legge, nasce la Società per azioni «Stretto di Messina», (S.M.), concessionaria di Stato. E nel 1985 inizia l'attività operativa della società, con l'affidamento della concessione per lo studio, la progettazione, la costruzione, nonché l'esercizio del solo collegamento stradale e con la stipula di una Convenzione per la predisposizione del progetto di massima del collegamento con le concedenti ANAS e FS.

Contestualmente ANAS e FS nominano due commissioni di esame che si esprimono a favore della fattibilità nel 1987. Ottenuto anche il parere favorevole del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 24 luglio 1987, la società Stretto di Messina può procedere alla redazione del progetto di massima, sotto l'alta sorveglianza delle due commissioni ANAS e FS.

Sembra proprio che il ponte ci sia già... almeno in questa panoramica simulazione, in cui lo Stretto di Messina è visto dalla sponda calabrese.

Il progetto di massima, corredato dei pareri della Delegazione alta sorveglianza ANAS e FS, viene presentato al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel maggio 1997, per arrivare, il 10 ottobre 1997, al voto del Consiglio stesso - con il quale si autorizza lo sviluppo della progettazione esecutiva - che consente al progetto del Ponte di Messina di fare un passo decisivo verso la realizzazione. A trent'anni dal bando per il concorso di idee, il progetto di massima, che corrisponde al progetto definitivo previsto dalla nuova Legge quadro sui lavori pubblici, pur con prescrizioni e osservazioni, viene ritenuto valido per essere sviluppato in un progetto esecutivo dal massimo organo di consulenza tecnica dello Stato.

Il presidente del Consiglio Romano Prodi che, come presidente dell'IRI, è stato attivo sostenitore del collegamento stabile, sollecitato a più riprese dall'Unione Europea, ha emanato, il 23 gennaio di quest'anno, una Direttiva per avviare l'adeguamento alla normativa comunitaria della concessione alla società «Stretto di Messina S.p.A.». D'altra parte l'Europa ha approvato un *master plan* per l'alta velocità ferroviaria che prevede per il 2010 il superamento di diverse «strozzature» nel continente, tra cui quella dello Stretto di Messina.

Nel luglio 1998 la Camera e il Senato hanno affrontato il tema con un'ampia discussione, da cui è emersa una chiara volontà di giungere in tempi ragionevoli alla realizzazione dell'opera. Il Parlamento ha impegnato il Governo a trasmettere il progetto di massima al CIPE, dove è giunto puntualmente il 15 agosto scorso. Si attende ora il parere del CIPE per proseguire l'iter della realizzazione del ponte.

Il progetto ingegneristico

Il ponte sullo Stretto di Messina, presentato nel progetto di massima, ha le caratteristiche principali indicate nella tabella qui a fianco. Dalle indicazioni si ricava tra l'altro che per ogni metro lineare del ponte il peso dei cavi è quasi doppio di quello dell'impalcato; ciò significa che il ponte è costituito principalmente dai cavi.

Le specifiche progettuali in termini di sicurezza, durabilità e condizioni di esercizio sono state previste con riferimento a una vita di servizio di 200 anni, mentre le azioni sul ponte sono state classificate secondo la loro natura. Il peso proprio della struttura e quello della pavimentazione e delle opere accessorie sono azioni permanenti, mentre i carichi stradali e ferroviari sono evidentemente azioni variabili. Tra le azioni ambientali, sono state considerate le variabili climatiche, come vento e temperatura, e le azioni geologiche, come eventuali sismi. Tra gli eventi eccezionali, infine, vanno considerati uragani e incidenti imprevedibili come l'urto da parte di un aereo o un'esplosione o ancora azioni di sabotaggio.

I fenomeni dominanti e più complessi sono stati indagati con ricerche sperimentali su modelli del ponte, verificando le soluzioni via via messe a punto, definendo i margini di incertezza del calcolo numerico, individuando a volte nuove soluzioni.

Entrando nel dettaglio tecnico, le ricerche hanno riguardato in particolare: l'aerodinamica e l'aeroelastica dell'impalcato e delle torri, studiate su modelli sezionali a diverse scale e su un modello dell'intero ponte; le prove meccaniche e a fatica sulle connessioni cassone ferroviario-traverso e cassone stradale-traverso; le prove meccaniche e a fatica e la caratterizzazione dinamica sperimentale dell'armamento ferroviario; lo studio aerodinamico dei pendini, di cavi e passerella; la sperimentazione dei fili; il modello cinematico del giunto di dilatazione dei binari ferroviari; il modello cinematico della zona che funge da cerniera tra l'impalcato e la torre; infine, la sperimentazione per l'ottimizzazione dei calcestruzzi delle sovrastrutture.

Per la definizione e l'ottimizzazione dei vari aspetti progettuali è stata individuata una serie di modelli di calcolo atti a simulare il comportamento strutturale in rapporto alle complesse azioni esterne elencate in precedenza: carichi di utenza, vento, sisma e così via. Gli algoritmi e i codici di calcolo sono stati individuati, testati e selezionati; in alcuni casi la validazione è stata ottenuta con apposite campagne sperimentali sui più grandi ponti esistenti e più precisamente: i ponti Humber, in Gran Bretagna, Bosforo 2, in Turchia, e Minami Bisan Seto, in Giappone.

La complessità dell'opera ne ha ovviamente richiesto un'adeguata modellazione matematica. Punto di partenza dell'analisi strutturale è il «modello globale» che rappresenta il ponte nel suo insieme e nelle sue interazioni con il terreno. Nella schematizzazione di impalcato, torri, cavi e così via sono stati impiegati circa 1700 elementi finiti. Il modello globale viene inoltre adattato di volta in volta per lo studio di fenomeni specifici, quali il comportamento sotto vento o la risposta a sollecitazioni sismiche o ancora le condizioni di sicurezza e di comfort in cui avviene il transito di mezzi stradali e ferroviari.

LUCE DELLA CAMPATA CENTRALE	3300 METRI
LUCE DELLE CAMPATE LATERALI	180 METRI
LARGHEZZA COMPLESSIVA DELL'IMPALCATO	60 METRI
AREA DEI CAVI PORTANTI:	4 × 1 METRI QUADRATI
DIAMETRO DEI CAVI PORTANTI	1,2 METRI
INTERASSE TRA LE COPPIE DEI CAVI	52 METRI
ALTEZZA DELLE TORRI	376 METRI SLM
VELOCITÀ DI *FLUTTER*	> 80 METRI AL SECONDO
PESO STRUTTURALE DELL'IMPALCATO	70 500 TONNELLATE
PESO DI OGNI TORRE	54 100 TONNELLATE
PESO COMPLESSIVO DEI CAVI PRINCIPALI	166 600 TONNELLATE
VOLUME DEI BLOCCHI DI ANCORAGGIO	237 000 - 328 000 METRI CUBI
VOLUME DELLE FONDAZIONI DELLE TORRI	72 400 - 86 400 METRI CUBI

LA SEZIONE TRASVERSALE DELL'IMPALCATO

52 m · 11,5 m · 8,25 m · 10 m · 8,25 m · 11,5 m · 4,2 m · 60,4 m

Per l'analisi di dettaglio di effetti e fenomeni locali vengono poi utilizzati modelli specifici, detti «locali», che rappresentano in modo assai più dettagliato singole parti dell'opera fino a visualizzare il ponte lamiera per lamiera, giunzione per giunzione.

Per le analisi sismiche è stata utilizzata essenzialmente la stessa struttura del modello impiegato per quelle statiche, prendendo però in considerazione le grandezze e i parametri necessari per portare a compimento un'analisi dinamica. Sono state effettuate integrazioni al passo a partire da accelerogrammi associati agli spettri di risposta, utilizzando 800 passi da 5 centesimi di secondo, per una durata stimata della scossa di 40 secondi.

L'impalcato previsto dal progetto - la cui forma è frutto di un'accurata ricerca sperimentale sia sul profilo trasversale, ottimizzato in galleria del vento, sia per quanto riguarda il peso -

In queste pagine sono illustrate le caratteristiche tecniche del progetto. In basso, la sezione longitudinale della struttura, dalla sponda siciliana a quella calabrese. Nei due riquadri soprastanti sono rappresentati i blocchi di ancoraggio, che hanno forme e peso tali da resistere alla tensione esercitata dalle due coppie di cavi. All'estrema sinistra, due viste delle torri, strutture snelle e flessibili che hanno il compito di trasmettere al suolo la componente verticale della tensione dei cavi e sono ottimizzate in funzione del comportamento aerodinamico e della risposta antisismica. In alto, la sezione trasversale del ponte, in cui sono evidenziate le corsie stradali e ferroviarie, che corrono a 64 metri di altezza sul livello del mare. Ai veicoli pesanti sono riservate le corsie centrali dell'impalcato.

si estende su un'unica campata della lunghezza totale di 3176 metri, che va simmetricamente dalla mezzeria fino a 62 metri dall'asse di ciascuna torre. La larghezza complessiva sarà di 60,4 metri, e la struttura portante sarà costituita da un graticcio collegato al sistema di sospensione, formato da tre cassoni scatolari longitudinali e da cassoni trasversali con interasse di 30 metri.

Il ponte è inoltre dotato di schermi frangivento i cui profili aerodinamici assicurano la stabilità aeroelastica con venti fino a 270 chilometri orari e riducono di oltre due terzi la spinta del vento sugli automezzi in transito.

La struttura progettata ospiterà, nel suo complesso, sei vie stradali e una via ferroviaria per ciascun senso di percorrenza. Dall'esterno verso l'interno esse sono costituite da: una via di servizio stradale per manutenzione e soccorso, della larghezza di 3,5 metri; una carreggiata stradale a tre corsie con pavimentazione bituminosa, larghe ciascuna 3,75 metri, rispettivamente per marcia lenta, marcia normale e sorpasso; è stata poi prevista un'ulteriore corsia stradale di sosta di emergenza con superficie grigliata della medesima larghezza, lungo la quale ogni 450 metri saranno disposte piazzole di sosta pavimentate; infine, sarà predisposta una via di servizio per le necessità delle linee ferroviarie larga 3,75 metri, con superficie grigliata. Per quanto concerne il traffico su rotaia, esso scorrerà lungo una via di corsa ferroviaria a doppio binario di ampiezza complessiva di circa 10 metri.

Sono qui evidenziate le strozzature dei collegamenti stradali e ferroviari che, secondo l'Unione Europea, devono essere eliminate.

Le torri del ponte sospeso, realizzate in acciaio, presentano una configurazione lamellare, costituita da due gambe di sezione ottagonale, ciascuna iscritta in un rettangolo di 16 × 12 metri, la cui conformazione è stata studiata in galleria del vento per ottimizzarla nei confronti degli effetti aerodinamici. L'altezza delle torri è di 370 metri e ciascuna gamba è formata da 21 elementi alti quasi 17 metri ciascuno, oltre a uno terminale di sommità, di 15,1 metri, che accoglie le selle dei cavi portanti. Il primo elemento è fissato nelle fondazioni mediante connettori a pioli che lo collegano al calcestruzzo dei plinti. L'elemento terminale ha i lati lunghi inclinati e termina in sommità con un *carter* di protezione delle selle.

Le fondazioni delle torri sono costituite da plinti di forma circolare, alla sommità dei quali sono fissate le gambe delle torri per una profondità di 12 metri. Il diametro dei pozzi è di 55 metri per la fondazione in Sicilia e di 48 per la fondazione in Calabria; i due pozzi di ciascuna sponda sono collegati tra loro da una trave della sezione di 18 × 15 metri.

I blocchi di ancoraggio dei cavi al terreno hanno forma prismatica, modellata per consentire un razionale inserimento nella morfologia locale e per ottenere il massimo sviluppo di superfici di contatto con il terreno, orientate perpendicolarmente alla risultante delle forze applicate dai cavi.

Oltre alle consuete verifiche strutturali, ci siamo concentrati essenzialmente su tre aspetti specifici: la percorribilità ferroviaria, le sollecitazioni e deformazioni sottovento e le sollecitazioni indotte dal sisma. Per quanto riguarda la percorribilità ferroviaria, le analisi indicano che adeguati livelli di sicurezza e di comfort possono essere conseguiti solo qualora i binari, e quindi la cosiddetta deformata del ponte, abbiano una geometria caratterizzata da assenza di cuspidi e raggi di curvatura sufficientemente ampi.

I problemi legati alle azioni del vento hanno suggerito di svincolare i cassoni stradali in corrispondenza delle torri, in modo da abbattere l'inerzia dell'impalcato tanto da ridurre i momenti flettenti trasversali, limitando le oscillazioni dell'impalcato stesso. Tutto ciò deve però preservare la continuità del cassone ferroviario, in modo da raccordare la deviazione su una lunghezza sufficiente a ottenere curvature trasversali che non disturbino la percorribilità ferroviaria, e allo stesso tempo siano sostenibili anche in caso di eventi estremi. Infine, gli approfonditi studi sulle sollecitazioni di origine sismica hanno ampiamente confermato il modesto effetto che un sisma, anche di elevata magnitudo, potrebbe avere sul ponte. Infatti è noto che i ponti sospesi, come quello di Messina, presentano frequenze proprie molto lontane da quelle tipiche dell'azione sismica. In base alle caratteristiche del progetto, il ponte potrà resistere a scosse di terremoto fino a 7,1 gradi della scala Richter.

Il sistema di sospensione è costituito essenzialmente da due coppie di cavi principali e dai pendini, i tiranti verticali che congiungono i cavi all'impalcato del ponte. La lunghezza totale in orizzontale dei cavi principali è pari a 5070 metri, ovvero la somma della luce centrale di 3300 metri più 960 metri che vanno ad ancorarsi sulla sponda siciliana e 810 su quella calabrese. Nella campata centrale ciascun cavo, del diametro di 1,24 metri, è composto da 88 funi da 13,5 centimetri ciascuna, per un totale di 44 352 fili elementari del diametro di 5,38 millimetri, realizzati in acciaio armonico trafilato e zincato a caldo per immersione con resistenza a rottura maggiore di 1770 newton per millimetro quadrato.

Le coppie di cavi sono disposte sulla verticale delle estremità dei trasversi dell'impalcato, a una distanza di 26 metri dall'asse dell'impalcato stesso; l'interasse tra i due cavi di ciascuna coppia è di 1,75 metri. Essi sono poi collegati ogni 30 metri da coppie di collari di acciaio ai quali sono sospesi i pendini.

La manutenzione del ponte

Per ovvie ragioni, un'opera di questa portata richiede una manutenzione altamente specializzata, per la cui gestione ci si dovrà basare su numerosi aspetti. Già durante la fase di costruzione e collaudo dell'opera si dovranno stabilire gli elementi che serviranno come riferimento per le successive attività di ispezione e monitoraggio. Ciò contribuirà a selezionare gli interventi di manutenzione ordinaria, a fissare il programma delle ispezioni e degli interventi e a deciderne le modalità di esecuzione.

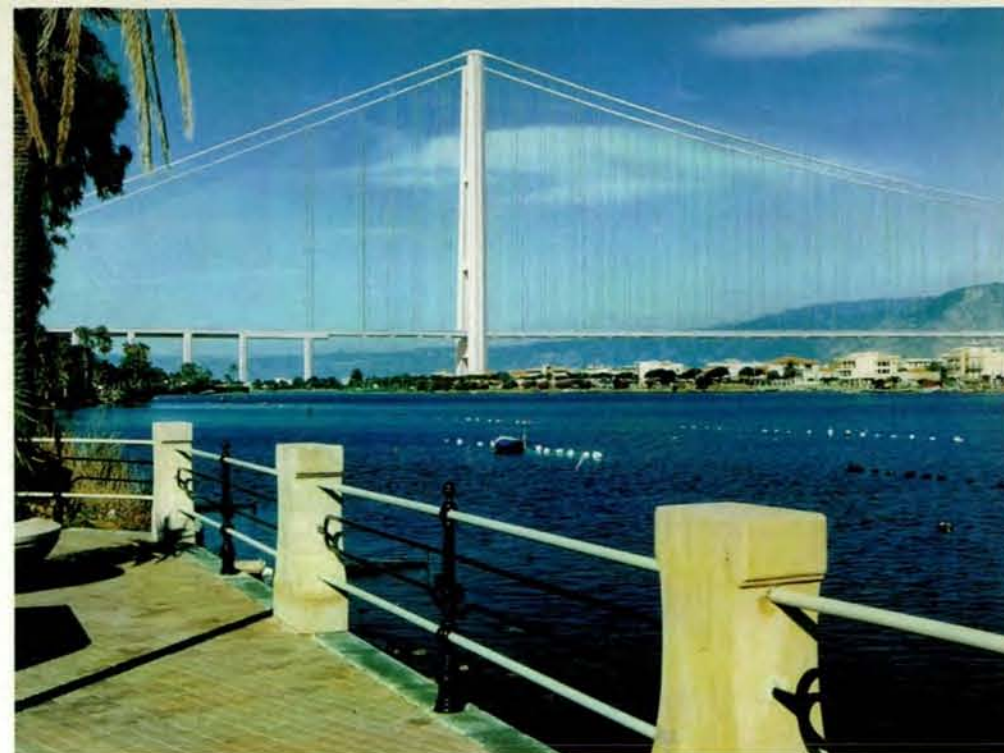
Per svincolare molte di tali attività dal traffico sulle carreggiate stradali sono state previste le due corsie di servizio poste alle estremità laterali della sezione di impalcato. Oltre a queste, altre due corsie saranno a disposizione dei mezzi di manutenzione e di soccorso delle linee ferroviarie, per il controllo della sede ferroviaria, dei marciapiedi, degli impianti di elettrificazione e di segnalamento e più in generale per tutte le attività di assistenza ai convogli ferroviari.

Questa simulazione al calcolatore dà un'idea di come apparirà l'opera vista da Pantano Grande, sulla sponda siciliana, versante nord.

Per quanto riguarda invece ispezioni e manutenzioni alle superfici inferiori dell'impalcato è previsto l'uso di carriponte di servizio, in grado di scorrere sotto l'impalcato per tutta la sua lunghezza, dai quali saranno accessibili tutte le superfici intradossali di cassoni, trasversi, cassoncini e griglie.

Per il sistema di sospensione le possibilità di ispezione sono articolate nel modo seguente: i dispositivi di ancoraggio sono raggiungibili, all'interno dei blocchi, con appositi percorsi accessibili dall'esterno, muniti di porte, cunicoli, scale; l'ispezione delle selle, contenute entro un carter di protezione, è resa possibile dall'accesso diretto al carter medesimo; i cavi principali e i collari sono invece ispezionabili sia con accesso diretto a piedi, mediante protezione con sistema di funi parapetto, sia per mezzo di uno speciale carrello traslatore.

Le questioni ambientali

Lo studio di impatto ambientale del ponte e delle relative opere complementari è articolato in due fasi: la prima, lo «Studio di compatibilità ambientale», riguarda non solo la vasta area del territorio interessata dalle opere di progetto e dalle alternative stradali e ferroviarie di allacciamento alla rete esistente, ma coinvolge anche tutta la zona circostante, che risentirà degli effetti dell'opera dal punto di vista socio-economico, urbanistico e territoriale. In questa prima fase sono stati verificati gli effetti delle alternative di scenario (con o senza l'opera) e delle alternative di collegamento stradale e ferroviario a livello internazionale, nazionale e locale. La seconda fase, detta «Studio di impatto ambientale», riguarda più specificamente la ricerca e la documentazione sulle interazioni tra le strutture, una volta realizzate, e l'ambiente, nelle aree interessate dalle opere di attraversamento stabile e dalle alternative preferenziali dei tracciati viari e ferroviari strettamente funzionali all'opera.

Dai due studi sono emersi, secondo i progettisti, risultati rassicuranti. Per quanto riguarda la componente suolo e sottosuolo le interazioni non assumono mai rilievo particolare, in quanto il contesto territoriale è caratterizzato da sostanziale stabilità ed equilibrio evolutivo. Eventuali problemi connessi all'accelerazione dei processi erosivi e all'interazione con il regime delle acque sotterranee verranno prevenuti con l'adozione di opportune misure già in fase di realizzazione dell'opera.

Per quanto riguarda il quadro idrico, l'assetto idrogeologico di entrambi i versanti non presenta caratteristiche tali da far prevedere impatti negativi con il contesto interessato. Le maggiori preoccupazioni erano state sollevate riguardo al fragile ecosistema dell'ambiente marino. In questo senso, però, l'ipotetico rischio di inquinamento dovuto al dilavamento delle acque di piattaforma o a cause accidentali verrà evitato grazie a un opportuno sistema di canalizzazione e raccolta a circuito chiuso già previsto nel progetto tecnico.

Le uniche aree che, relativamente alla situazione globale del territorio, possono essere considerate potenzialmente sensibili, sono quelle di Capo Peloro, per le quali però è stato messo a punto uno specifico progetto di riqualificazione, finalizzato alla salvaguardia degli ambiti naturali ancora integri e al recupero delle aree attualmente degradate, attraverso criteri di restauro naturalistico e l'utilizzo di tecniche di bioingegneria.

Nel corso del progetto sono inoltre stati messi a punto opportuni modelli di simulazione per valutare l'entità degli inquinanti che verranno immessi in atmosfera quando l'opera entrerà in esercizio. Secondo i risultati di queste simulazioni non solo non si creeranno situazioni di impatto significative, ma si avranno addirittura notevoli benefici per l'aria degli insediamenti urbani che fino a oggi hanno sofferto per l'intenso traffico di attraversamento, che sarà deviato dal nuovo assetto infrastrutturale.

Gli aspetti economici

Il costo complessivo (stimato in base al valore della lira nel 1997), comprensivo di imprevisti, spese tecniche e generali, è stato valutato in circa 5100 miliardi per il ponte e le sue pertinenze fino alle barriere di esazione, più 2100 miliardi per i collegamenti viari e ferroviari fino alle infrastrutture esistenti in Sicilia e Calabria. Questa stima è il risultato di un'accurata ricerca di mercato, dell'aggiornamento delle offerte di imprese altamente specializzate nel settore e dell'esperienza acquisita dalle aziende italiane che hanno partecipato, in Danimarca, alla realizzazione del ponte sospeso sul Grande Belt, che con i suoi 1620

PREVISIONI CON PONTE	ANNO 2007	ANNO 2037
PASSEGGERI/ANNO SU STRADA	10 032 800	20 139 900
PASSEGGERI/ANNO SU FERROVIA	5 986 800	12 017 900
PASSEGGERI/ANNO TOTALI	16 019 600	32 157 800
AUTOVETTURE	4 560 400	9 154 500
CARROZZE FERROVIARIE	149 700	300 400
MERCI SU STRADA (TONN./ANNO)	13 766 400	28 875 900
MERCI SU FERROVIA (TONN./ANNO)	3 629 700	7 613 500
MERCI TOTALI (TONN./ANNO)	17 396 100	36 489 400
AUTOCARRI EQUIVALENTI	1 311 100	2 750 100
CARRI MERCI	203 900	427 700

metri di luce della campata centrale è il secondo ponte più lungo del mondo.

Nel 1996 il volume di traffico attraverso lo Stretto è stato pari a oltre 13,2 milioni di passeggeri e 1,1 milioni di autocarri equivalenti che, sommati ai 32 treni passeggeri e circa 30 treni merci giornalieri, hanno richiesto 154 000 corse di traghetti, aliscafi e navi veloci (mediamente una ogni 4 minuti). Il costo complessivo dell'attuale sistema di traghettamento ammonta a circa 350 miliardi di lire all'anno e pari entità ha il valore economico del tempo perso da viaggiatori e merci nell'attraversamento.

Le previsioni del traffico futuro in presenza del ponte sono state elaborate con criteri rigorosi e ipotesi «prudenziali», da cui si è ricavato uno «scenario attendibile» e certamente superabile che conduce al raddoppio dei volumi di traffico in circa 30 anni. Le condizioni indicate permettono di prevedere i flussi di traffico riportati nella tabella qui sopra.

Oltre allo scenario attendibile appena richiamato, si è valutato uno scenario «di minimo prudenziale», sulla base del quale si è condotta l'analisi costi-benefici dell'investimento. Quest'ultima, elaborata secondo i criteri di valutazione normalmente adottati dagli organismi finanziari internazionali, ha tenuto conto dei costi di investimento e di esercizio connessi con l'insieme costituito dal ponte e dai collegamenti stradali e ferroviari e dei benefici diretti e indiretti che derivano dal confronto tra lo scenario «con ponte» e quello «senza ponte».

Malgrado l'analisi economica sia stata condotta assumendo le ipotesi più sfavorevoli di previsioni di traffico e trascurando una molteplicità di benefici importanti ma non direttamente monetizzabili, i risultati confermano la convenienza economica dell'iniziativa dal punto di vista generale del beneficio per la collettività. Nello scenario prudenziale, senza effetto metropolitano (cioè di integrazione metropolitana tra le città dello Stretto), si ottiene un saggio di rendimento economico prossimo all'8 per cento, mentre in presenza di effetto metropolitano lo stesso saggio risulta superiore al 10 per cento. Questi valori risultano inoltre sostanzialmente «stabili» all'interno di un ampio campo di variabilità (±15 per cento) delle grandezze in gioco.

Per quanto riguarda gli effetti occupazionali dell'opera negli 8-9 anni che saranno necessari per portarla a compimento, le proiezioni indicano che gli occupati annui diretti saranno circa 4600, mentre l'indotto dovrebbe assommare a 9250 unità. La successiva fase di gestione dell'opera impegnerà circa 500 unità (tra esercizio e manutenzione) con un indotto di ulteriori 450 unità medie per anno. Il notevolissimo contenuto tecnologico del progetto e la dimensione dell'intervento prefigurano però importanti ricadute per diversi settori produttivi, non solo in termini di occupazione e di ricavi, ma anche in termini di rivitalizzazione dell'economia locale e di rilancio d'immagine in ambito internazionale.

La fattibilità finanziaria dell'iniziativa è stata anch'essa analizzata con ipotesi prudenziali per verificare la possibilità di ricorrere anche a capitali privati nazionali e internazionali, sia di rischio sia di prestito. Sono state formulate ipotesi di piano finanziario calibrate su differenti scenari sia di traffico sia tariffari. Quale scenario centrale di traffico si è assunto quello già descritto come il più attendibile, mentre per le tariffe di pedaggio si sono esplorati livelli compresi tra l'80 per cento e il 120 per cento delle attuali tariffe per i mezzi gommati e tra il 50 per cento e il 100 per cento del costo attualmente sostenuto dalle Ferrovie dello Stato per il transito dei propri convogli.

I risultati ottenuti mostrano che l'investimento per la realizzazione del ponte e delle sue pertinenze fino alle aree di esazione può autofinanziarsi attraverso il pedaggio in una percentuale che può raggiungere il 90 per cento, assicurando un rendimento al capitale investito in linea con l'andamento del mercato, mentre il *pay-back* dell'iniziativa si colloca al sedicesimo anno di esercizio. Sono infine da evidenziare i notevoli «rientri» conseguibili per la finanza pubblica, sia per la riduzione dei costi di esercizio del traghettamento, sia per il risparmio conseguibile negli investimenti alternativi al ponte previsti dall'accordo di programma del 1989 per l'area dello Stretto (956 miliardi direttamente imputabili a opere per l'attraversamento dello Stretto), sia infine per i cospicui introiti tributari che lo Stato otterrebbe sui flussi incrementali di reddito generati dall'investimento e percepiti sia dalle persone giuridiche sia da quelle fisiche interessate nella costruzione (circa 1000 miliardi di lire di imposte e oneri sociali nella sola fase di costruzione).

I tempi di esecuzione dell'opera di attraversamento dello Stretto e dei collegamenti delle reti autostradali e ferroviarie, sommati ai due anni necessari per le sperimentazioni del progetto esecutivo e per le relative verifiche, dovrebbero tranquillizzare tutti coloro che temono la costruzione di una cattedrale nel deserto; in più di un decennio infatti le due regioni non potranno non essere dotate di un sistema ferroviario e autostradale paragonabile al resto d'Europa.

AURELIO S. MISITI, ingegnere idraulico, è professore ordinario di ingegneria sanitaria-ambientale presso l'Università «La Sapienza» di Roma, ed è attualmente Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Comunicazione del prof. Giuseppe Nisticò, Università «Tor Vergata», Roma.

Pareri del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici del 24 luglio 1987 e del 10 ottobre 1997.

*BRANCALEONI F. e DIANA G., *The Aerodynamic Design of the Messina Straits Bridge.*

*DIANA G., FALCO M., CHELI F. e CIGADA A., *Experience Gained in the Messina Bridge Aeroelastic Project.*

*DIANA G., CHELI F., NATONI F., TRAINI G., BRUNI S. e COLLINA A., *Noise and Vibration Induced by Train: the Case of Messina Bridge.*

* Tutti e tre gli articoli in *Atti del Japan-Italy Workshop*, Milano, 7/5/1998.

MATSUMOTO M., *Perspective on Long Span Bridge Aerodynamics on Flutter Stabilization*, in *Long-Span and High-Rise Structures*, Iabse Symposium, Kobe, 2 settembre 1998.

La genetica delle capacità e delle disfunzioni cognitive

Lo studio delle caratteristiche individuali dell'intelligenza può aiutare a chiarire il ruolo dei geni nella formazione dell'intelletto

di Robert Plomin e John C. DeFries

Gli esseri umani sono molto diversi tra loro in tutti gli aspetti di ciò che viene chiamato intelligenza. Le differenze si evidenziano non solo a scuola - dalla materna alle superiori - ma anche nelle più comuni circostanze: nelle parole che vengono usate e comprese, nella diversa capacità di leggere una mappa o di seguire determinate istruzioni, nell'abilità di ricordare i numeri telefonici o di fare operazioni a mente. Il fatto che queste capacità specifiche siano così diversificate da un individuo all'altro è talmente abituale da essere dato per scontato. Ma che cosa rende le persone così diverse?

Si potrebbe pensare che le differenze nelle capacità cognitive siano determinate dall'ambiente: noi siamo quello che apprendiamo. È chiaro, per esempio, che gli esseri umani non sono dotati alla nascita di un vocabolario completo, ma devono imparare le parole. È quindi nel meccanismo dell'apprendimento che si determinano le differenze di lessico tra gli individui. E differenti esperienze - per quanto riguarda, per esempio, la capacità dei genitori di porsi come modello e stimolo lessicale, o la qualità dell'insegnamento scolastico della lingua - devono essere responsabili delle differenze individuali nell'apprendimento.

All'inizio di questo secolo, in psicologia, la spiegazione più accreditata della diversità nelle capacità cognitive si basava sulle differenze ambientali. Più recentemente, la maggior parte degli psicologi ha cominciato ad adottare un punto di vista più equilibrato, secondo il quale fattori biologici e ambientali interagiscono nello sviluppo cognitivo. Negli ultimi decenni, gli studi di genetica hanno portato a ipotizzare un ruolo fondamentale dell'ereditarietà nel modellare le componenti dell'intelletto, e si è addirittura iniziato a scoprire quali siano i geni implicati nella funzione cognitiva. Questi risultati non portano a rifiutare l'idea del condizionamento ambientale dell'apprendimento, ma piuttosto a ritenere che le differenze genetiche tra gli individui condizionino la facilità con la quale essi apprendono.

Quanto contano i geni e quanto l'ambiente per un'abilità specificamente cognitiva come quella lessicale? Questa è la domanda a cui abbiamo cercato di dare una prima risposta. Nel nostro studio ci basiamo sulla genetica quantitativa, un metodo statistico che indaga le cause della variabilità dei tratti individuali. Confrontando, per esempio, i risultati ottenuti da gemelli e da bambini adottati in alcuni test cognitivi, si può stabilire fino a che punto contino la natura e l'educazione.

Passando in rassegna parecchi decenni di tali studi, e conducendone altri per nostro conto, abbiamo iniziato a chiarire le relazioni tra processi intellettivi specializzati, come il ragionamento verbale e quello spaziale, nonché quelle tra funzioni cognitive normali e disfunzioni come la dislessia. Con l'aiuto della genetica molecolare, noi e altri studiosi abbiamo anche iniziato a identificare i geni che influenzano queste specifiche capacità e disfunzioni. Riteniamo che la conoscenza di questi geni servirà a rivelare i meccanismi biochimici coinvolti nell'intelligenza umana; e, grazie alle scoperte della genetica, si potranno forse un giorno realizzare interventi di tipo ambientale che riducano e prevengano gli effetti dei disturbi cognitivi.

Alcuni trovano allarmante, o quanto meno fuorviante, l'idea che i geni abbiano un ruolo nell'intelligenza. È importante, perciò, chiarire fin dall'inizio che cosa intendano esattamente i genetisti quando parlano di influenza genetica. Il termine che viene generalmente usato è «ereditarietà»: una misura statistica del contributo genetico alle differenze tra gli individui.

Capacità verbali e spaziali

L'ereditarietà ci dice quanta parte delle differenze individuali all'interno di una popolazione, la cosiddetta variabilità, si possa ascrivere ai geni. Se diciamo, per esempio, che una caratteristica è ereditabile al 50 per cento, ciò significa in effetti che metà della variabilità di quella caratteristica è legata all'eredità. L'ereditarietà, allora, è un modo per spiegare che cosa renda diverse le persone, non che cosa costituisca l'intelligenza di un certo individuo. In generale, tuttavia, se l'ereditarietà di un carattere è alta, sarà altrettanto forte anche l'influenza genetica su quel carattere nei singoli individui.

I primi tentativi di quantificare l'ereditarietà di specifiche capacità cognitive cominciarono con gli studi su famiglie. Le analisi delle somiglianze tra genitori e figli e tra fratelli hanno dimostrato che le capacità cognitive si trasmettono all'interno delle famiglie. I risultati del più ampio studio su famiglie centrato su specifiche abilità cognitive, svoltosi alle Hawaii negli anni settanta, hanno aiutato a quantificare queste somiglianze.

L'Hawaii Family Study of Cognition era il frutto della collaborazione tra ricercatori dell'Università del Colorado a Boulder e dell'Università delle Hawaii e coinvolse più di mille famiglie e coppie di fratelli. Lo studio determinò la correlazione (una misura statistica della somiglianza) tra parenti in prove di abilità verbale e spaziale. Una correlazione pari a 1,0 stava a significare che i punteggi

I gemelli sono abituali soggetti di ricerca negli studi su specifiche capacità cognitive. Due coppie di gemelli monozigoti (*pagina a fronte*) ed eterozigoti (*qui sotto*), che partecipano alla ricerca condotta dagli autori, stanno eseguendo un compito in un test di abilità spaziale: cercano di ricostruire un modello con i loro giochi di costruzione. In questi test, somministrati individualmente a ciascun bambino, i punteggi dei gemelli monozigoti (che hanno geni identici) sono molto più simili dei punteggi dei gemelli eterozigoti (che condividono circa metà dei geni): un indizio che l'eredità genetica influisce sull'abilità spaziale.

David Kamphner, Gamma Liaison

dei membri della famiglia erano identici; una correlazione pari a zero indicava che i punteggi non erano più simili di quelli di due persone prese a caso. Dato che i figli in media condividono metà dei loro geni con ciascuno dei genitori e con i fratelli, la più alta correlazione su base genetica che ci si potesse attendere nei punteggi dei test era pari a 0,5.

Lo studio ha dimostrato che i membri di una famiglia presentano di fatto maggiori somiglianze tra loro che con individui non consanguinei nella misura di specifiche capacità cognitive. La reale correlazione sia per le prove verbali sia per quelle spaziali è stata, in media, attorno a 0,25. Da sole, però, queste correlazioni non rivelano se le capacità cognitive siano simili nelle famiglie per cause genetiche o ambientali. Per indagare su questa distinzione, i genetisti si basano su due «esperimenti»: il gemellaggio (un esperimento biologico) e l'adozione (un esperimento sociale).

Gli studi sui gemelli sono il cavallo di battaglia della genetica comportamentista. Viene messa a confronto la somiglianza tra gemelli monozigoti, che hanno lo stesso patrimonio genetico, e quella tra gemelli eterozigoti, che hanno in comune solo circa metà dei geni. Se le capacità cognitive subiscono influenze genetiche, i gemelli monozigoti dovrebbero essere molto più simili fra loro nelle prove relative alle capacità cognitive. Dalle correlazioni rilevate in questo tipo di studi, si può valutare fino a che punto i geni intervengano a determinare la variabilità nella popolazione. In effetti, si può fare una stima approssimativa dell'ereditarietà raddoppiando la differenza tra la correlazione tra gemelli monozigoti e quella tra gemelli eterozigoti.

L'adozione è il metodo più diretto per separare natura ed educazione nelle somiglianze familiari, creando coppie di individui geneticamente collegati che non hanno un ambiente familiare in comune. Le correlazioni tra queste coppie permettono di valutare il contributo dei fattori genetici nelle somiglianze all'interno della famiglia. L'adozione produce anche coppie di individui non collegati a livello genetico che condividono un ambiente familiare; le loro correlazioni permettono di calcolare il contributo dell'ambiente alla somiglianza.

Gli studi su specifiche abilità cognitive nei gemelli, condotti per trent'anni in quattro paesi, hanno fornito risultati molto coerenti tra loro (*si veda l'illustrazione a pagina 54*). Nei bambini, negli adolescenti e negli adulti, la correlazione tra gemelli monozigoti supera di molto quella tra gemelli eterozigoti, sia nelle prove verbali sia in quelle spaziali. I risultati del primo studio condotto su gemelli anziani - reso noto nel 1997 da Gerald E. McClearn e colleghi della Pennsylvania State University e da Stig Berg e collaboratori dell'Istituto di gerontologia di Jönköping in Svezia - dimostrano che la somiglianza tra gemelli monozigoti ed eterozigoti si conserva anche in età avanzata. I gerontologi hanno ipotizzato che le differenze genetiche diventino meno importanti con l'accumularsi delle esperienze nel corso degli anni, ma la ricerca sulle capacità cognitive ha fin qui dimostrato il contrario. In base ai calcoli ricavati dai risultati combinati delle ricerche, risulta che in generale i fattori genetici incidono sulla variabilità per il 60 per cento nell'abilità verbale e per il 50 per cento nell'abilità spaziale.

Le ricerche sugli adottati hanno dato risultati analoghi. Due recenti studi su gemelli allevati separatamente - l'uno condotto da Thomas J. Bouchard, Jr., Matthew McGue e colleghi dell'Università del Minnesota, l'altro nato da una collaborazione internazionale guidata da Nancy L. Pedersen del Karolinska Institut di Stoccolma - portano a concludere che l'ereditarietà sia di circa il 50 per cento tanto per le abilità verbali quanto per quelle spaziali.

Nel Colorado Adoption Project, che abbiamo avviato nel 1975, ci siamo serviti degli studi sull'adozione per caratterizzare ulteriormente i rispettivi ruoli dei geni e dell'ambiente, per stabilire tendenze nello sviluppo delle abilità cognitive e per indagare fino a che punto specifiche abilità cognitive siano collegate le une alle altre. Oggi il Progetto mette a confronto le correlazioni tra più di 200 bambini adottati e i loro genitori biologici e adottivi con le correlazioni relative a un gruppo di controllo di bambini allevati dai loro genitori biologici (*si veda l'illustrazione a pagina 55*).

Questi dati conducono a osservazioni sorprendenti. Nella media infanzia, per esempio, le madri biologiche e i loro figli adottati da altri sono simili quanto genitori e figli del gruppo di controllo, relativamente ai valori sia dell'abilità verbale sia di quella spaziale. I punteggi dei bambini adottati, invece, non sono affatto simili a quelli dei loro genitori adottivi. Questi risultati vanno a confermare la scarsa influenza che il comune ambiente familiare esercita sulle somiglianze tra i membri della famiglia. La somiglianza familiare sembra essere invece controllata quasi interamente da fattori genetici, e i fattori ambientali spesso finiscono per rendere i membri della famiglia diversi e non uguali.

I dati del nostro studio mettono in luce anche un'interessante tendenza dello sviluppo. L'influenza genetica sembra crescere durante l'infanzia, e a metà dell'adolescenza l'ereditarietà raggiunge un livello comparabile a quello verificato tra gli adulti. Nelle correlazioni relative all'abilità verbale, per esempio, la somiglianza tra i genitori biologici e i loro figli adottati da altri cresce, passando dallo 0,1 a tre anni allo 0,3 circa a 16 anni. Una distribuzione simile si ha per i valori nelle prove di abilità spaziale. Alcune trasformazioni della funzione cognitiva determinate geneticamente sembrano aver luogo nei primi anni di scolarizzazione, verso i sette anni. I risultati indicano che, quando si raggiungono i 16 anni, i fattori genetici incidono per il 50 per cento sulla variabilità per quanto riguarda l'abilità verbale e per il 40 per cento per l'abilità spaziale: cifre non dissimili da quelle ricavate, per specifiche abilità cognitive, dagli studi sui gemelli.

Il Colorado Adoption Project e altre ricerche hanno anche contribuito a chiarire differenze e analogie tra le capacità cognitive. Oggi la neuroscienza cognitiva adotta un modello di intelligenza «modulare», in cui i diversi processi cognitivi sono isolati dal punto di vista anatomico in moduli cerebrali discreti. Questo modello implica che abilità cognitive

Tra i test su specifiche abilità somministrati ad adolescenti e adulti, ce ne sono di simili a quelli qui elencati. I test misurano in molti modi ciascuna capacità cognitiva, e vengono usati in combinazione per ottenere una misura attendibile di ciascuna abilità. (Le risposte sono a pagina 58.)

TEST DI ABILITÀ VERBALE

1. VOCABOLARIO: In ciascuna riga, fai un cerchio intorno alla parola che ha un significato analogo a quella sottolineata. La risposta esatta è una sola.

a. arido — ruvido — astuto — modesto — secco
b. piccante — gustoso — pungente — dannoso — onesto

2. SCIOLTEZZA VERBALE: Nei prossimi tre minuti, scrivi quante più parole riesci a trovare che inizino con F e terminino con I.

3. CATEGORIE: Nei prossimi tre minuti, elenca tutte le cose PIATTE a cui riesci a pensare.

Jennifer C. Christiansen

TEST DI ABILITÀ SPAZIALE

1. TAGLIO IMMAGINARIO: Traccia una o più linee per mostrare come si debba tagliare la figura a sinistra per ottenere i pezzi a destra. Ci possono essere più modi diversi per rispondere correttamente.

2. ROTAZIONI MENTALI: Fai un cerchio sui due oggetti a destra che sono identici all'oggetto a sinistra.

a b c d

3. ROTAZIONI DI CARTONCINI: Fai un cerchio sulle figure a destra che, ruotate (senza sollevarle dalla pagina), corrispondono esattamente a quella a sinistra.

a b c d e

4. FIGURE NASCOSTE: Circonda i disegni in cui compare la figura. La figura deve essere in questa posizione, non capovolta o ruotata.

a b c d e f g

Jennifer C. Christiansen

In che modo le capacità cognitive sono collegate all'intelligenza?

di Karen Wright

Fin dalle origini della psicologia, gli studiosi si sono trovati in disaccordo sulla natura dell'intelligenza. Alcuni hanno sostenuto che l'intelligenza è una facoltà innata che viene ereditata, altri hanno molto insistito sugli effetti dell'educazione scolastica e familiare. Altri hanno descritto l'intelligenza come una qualità globale che pervade tutti gli aspetti della conoscenza. Altri ancora ritengono che l'intelletto sia costituito da abilità specifiche e distinte, come il talento artistico o l'attitudine alla matematica, che non hanno alcun principio comune.

Negli ultimi decenni, gli studi di genetica hanno convinto molti psicologi della forte influenza esercitata dall'eredità sull'intelligenza. In effetti, sulla base delle ricerche, si è portati a ritenere che la variazione dell'intelligenza tra gli individui si possa attribuire anche in parte a fattori genetici.

La maggior parte degli psicologi è giunta anche ad accettare una definizione globale dell'intelligenza. Questa qualità globale, definita capacità cognitiva generale o «*g*», emerge nell'evidente sovrapposizione tra le specifiche abilità cognitive. Come mettono in evidenza Robert Plomin e John C. DeFries, chi ottiene buoni risultati in prove che riguardano un certo tipo di abilità cognitiva tende a far bene anche nelle prove relative ad altre abilità. Questa correlazione costituisce una giustificazione per i test del QI (quoziente d'intelligenza), in cui un singolo punteggio nasce dalla misurazione combinata di specifiche abilità cognitive.

Dato che le abilità cognitive generali e specifiche sono correlate in questo modo, non deve sorprendere che molti risultati a cui si giunge per le abilità specifiche riecheggino ciò che già si sa sulla capacità cognitiva generale. I fattori ereditari ricavati dagli studi sulle abilità cognitive specifiche, per esempio, sono confrontabili con quelli determinati per *g*. La tendenza nello sviluppo descritta dagli autori - secondo la quale l'influenza genetica sulle abilità cognitive specifiche sembra crescere durante l'infanzia e raggiungere i livelli degli adulti a metà dell'adolescenza - è familiare anche a coloro che svolgono ricerche sulla capacità cognitiva in generale.

Visto poi che le misure di *g* derivano dalle correlazioni tra le abilità verbali e quelle spaziali, un gene che sia legato a entrambi questi tratti quasi sicuramente ha anche un ruolo nel determinare la capacità cognitiva generale e viceversa. Plomin e altri suoi collaboratori hanno pubblicato nel numero del maggio 1998 di «Psychological Science» la scoperta del primo gene associato all'abilità cognitiva generale. Anche se il risultato getta nuova luce sulla natura dell'attività cognitiva, probabilmente riaccenderà il dibattito. È proprio vero che la ricerca sull'intelligenza è un campo in cui l'approfondimento delle conoscenze non riduce i dissensi.

KAREN WRIGHT è una giornalista *freelance* statunitense.

specifiche siano anche geneticamente distinte: le influenze genetiche sull'abilità verbale, per esempio, non si sovrappongono a quelle sull'abilità spaziale.

Gli psicologi, tuttavia, riconoscono da tempo che molte capacità cognitive specializzate, comprese l'abilità verbale e quella spaziale, hanno una certa correlazione tra loro: una persona che riesce bene in un tipo di prova tende anche a far bene nelle altre. Le correlazioni tra abilità verbali e abilità spaziali, per esempio, sono di solito intorno a 0,5; tale intercorrelazione implica un possibile legame genetico.

Dalle capacità alle prestazioni

Anche gli studi di genetica sulle specifiche abilità cognitive non corroborano il modello modulare. Sembra invece che i geni siano responsabili della maggior parte delle sovrapposizioni tra abilità cognitive. L'analisi dei dati del Colorado Project, per esempio, indica che fattori genetici determinano il 70 per cento della correlazione tra abilità verbale e abilità spaziale. Risultati analoghi hanno dato gli studi su gemelli di varie età. C'è allora una buona probabilità che, quando vengono identificati i geni associati a una particolare abilità cognitiva, si possano collegare gli stessi geni ad altre abilità cognitive.

I geni associati alle abilità cognitive possono anche essere importanti per i risultati scolastici. John C. Loehlin dell'Università del Texas ad Austin e Robert C. Nichols, allora alla National Merit Scholarship Corporation di Evanston (Illinois), hanno svolto una serie di studi su più di 2000 coppie di gemelli che frequentavano la scuola superiore. In questi studi i punteggi dei gemelli monozigoti erano costantemente e notevolmente più simili tra loro di quelli dei gemelli eterozigoti in tutte le quattro materie del National Merit Scholarship Qualifying Test: inglese, matematica, studi sociali e scienze naturali. Questi risultati portano a ritenere che i fattori genetici siano responsabili del 40 per cento circa della variabilità in prove di questo genere.

L'influenza genetica sulle prestazioni scolastiche è emersa anche da studi sui gemelli che frequentavano la scuola elementare, così come dal nostro lavoro nel Colorado Adoption Project. Sembra che i geni possano avere sulla riuscita scolastica un'influenza pari a quella esercitata sulle abilità cognitive. Questi risultati sono sorprendenti: gli insegnanti hanno a lungo ritenuto che il successo scolastico derivi più dall'impegno che da abilità innate. Ancora più interessante è il fatto di aver scoperto, attraverso gli studi sui gemelli e il nostro Progetto sull'adozione, che le influenze genetiche sulle diverse categorie di prestazione si sovrappongono, e che questi geni sono probabilmente gli stessi fattori genetici che influenzano le capacità cognitive.

Questi dati vanno a sostegno di una visione decisamente non modulare dell'intelligenza, che sarebbe una qualità globale e pervasiva della mente, e sottolineano l'importanza delle capacità cognitive nella vita reale; inoltre, i geni responsabili delle capacità cognitive sono probabilmente anche coinvolti nel successo scolastico e viceversa.

Dimostrata l'influenza genetica sulle capacità cognitive e sull'apprendimento, ci si potrebbe aspettare che anche le disfunzioni cognitive e l'insuccesso scolastico dipendano in parte da un condizionamento genetico. In realtà, anche se alcuni geni sono coinvolti nei disturbi cognitivi, possono non essere gli stessi geni che influenzano la funzione cognitiva normale. Un esempio in proposito è quello del ritardo mentale. Il ritardo mentale lieve è ereditario, ma quello grave no. Il ritardo mentale grave è causato da particolari fattori sia genetici sia ambientali - mutazioni insolite, complicanze alla nascita, lesioni cerebrali, per nominarne solo alcuni - che normalmente non entrano in gioco nel determinare l'intelligenza.

Che cosa significa ereditarietà

Spesso si fraintende il significato dei dati sull'ereditarietà. Come detto nel testo, l'ereditarietà è una misura statistica, espressa sotto forma di percentuale, che indica fino a che punto i fattori genetici contribuiscano alle variazioni di un determinato tratto tra i membri di una popolazione.

Il fatto che i geni influenzino un tratto, però, non significa che esista un «destino biologico». La ricerca genetica, anzi, è servita a confermare l'importanza dei fattori ambientali che, in generale, sono responsabili quanto i geni della varietà dei comportamenti umani. Se l'intelligenza si eredita al 50 per cento, i fattori ambientali devono essere altrettanto importanti nel generare differenze tra gli individui.

C'è di più: anche quando i fattori genetici hanno un'influenza particolarmente forte, come in alcuni tipi di ritardo mentale, l'intervento ambientale può spesso superare, completamente o in parte, le «determinanti genetiche». Per esempio, gli effetti di una terribile malattia genetica, la fenilchetonuria - che può provocare ritardo mentale - possono essere spesso annullati da una dieta specifica.

Infine, il grado di ereditarietà per un dato tratto non è fissato una volta per tutte. La rispettiva influenza dei geni e dell'ambiente può mutare. Se, per ipotesi, i fattori ambientali venissero resi uguali per tutti i membri di una popolazione, qualsiasi differenza nelle abilità cognitive che si verificasse in quella popolazione dovrebbe allora essere attribuita alla genetica, e l'ereditarietà sarebbe più vicina al 100 per cento che al 50 per cento. L'ereditarietà descrive ciò che è, e non ciò che potrebbe (o dovrebbe) essere.

È necessario individuare, anziché presupporre, i legami genetici tra il normale e l'anormale, tra i tratti che fanno parte di un intervallo di variabilità piuttosto esteso e i veri disturbi cognitivi. Tuttavia gli studi genetici sui disturbi a livello verbale e spaziale sono stati pochi e distanziati nel tempo.

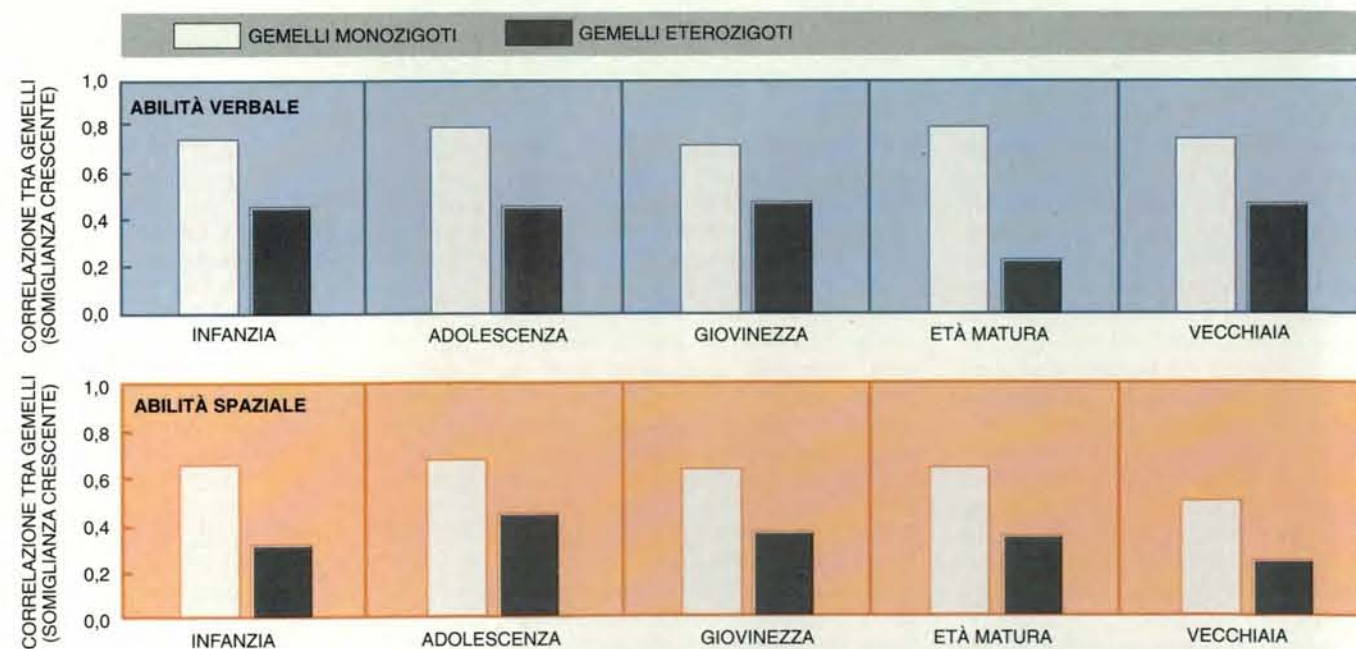
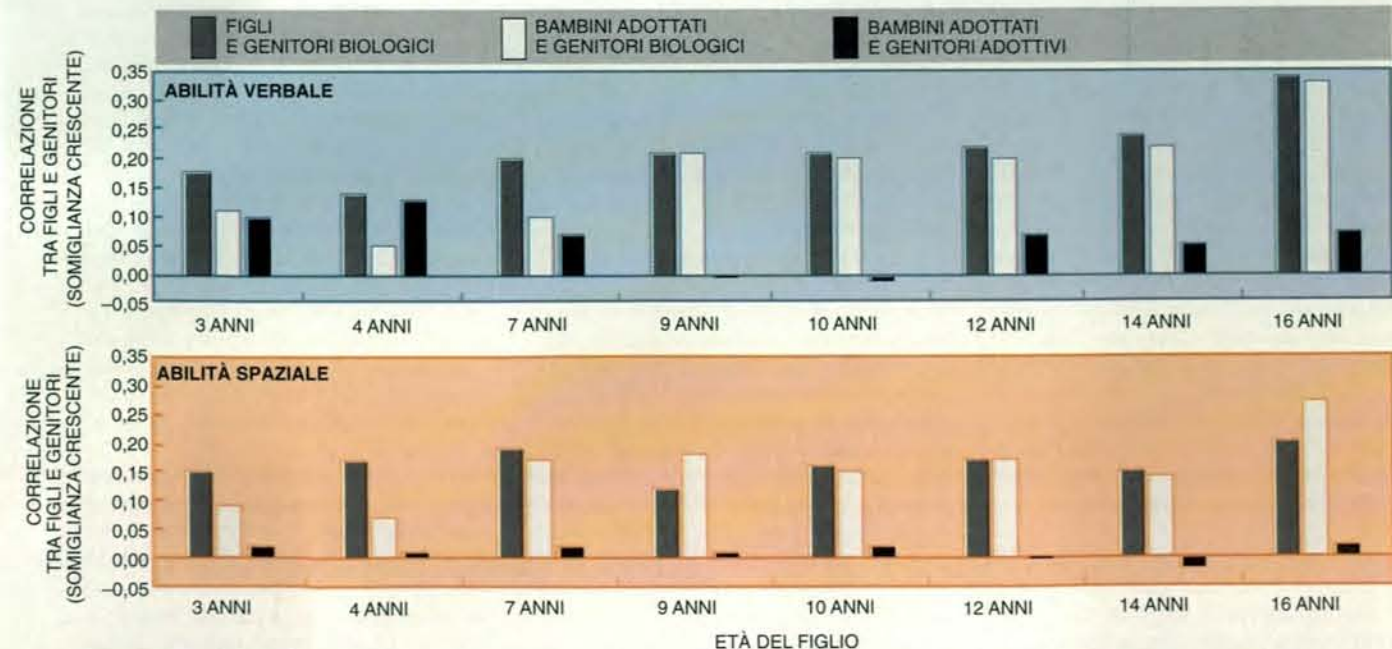
Genetica e disfunzioni

Molti ricercatori si sono concentrati sulle deficienze nella lettura, che affliggono l'80 per cento dei bambini a cui è stato diagnosticato un disturbo dell'apprendimento. I bambini con problemi di lettura, detti anche dislessici, leggono lentamente, comprendono poco quello che leggono e hanno difficoltà a leggere ad alta voce (si veda l'articolo *La dislessia* di Sally E. Shaywitz in «Le Scienze» n. 341, gennaio 1997). Studi condotti da uno di noi (DeFries) hanno dimostrato che la dislessia ricorre all'interno di certe famiglie e che a essa contribuiscono anche fattori genetici. Il gemello monozigote di una persona a cui è stata diagnosticata dislessia ha, per esempio, il 68 per cento di rischio che gli venga fatta una diagnosi analoga, mentre un gemello eterozigote ha una probabilità solo del 38 per cento.

Questa influenza genetica è in qualche modo collegata ai geni associati alla normale variazione nell'abilità di lettura? La domanda pone alcune sfide metodologiche. Il concetto di disturbo cognitivo è in se stesso problematico, perché affronta il problema da un punto di vista qualitativo - una persona o ha il disturbo o non ce l'ha - invece di descrivere il grado della disfunzione in termini quantitativi. Questa impostazione crea un divario analitico tra disturbi e tratti suscettibili di ampia variazione, che sono per definizione quantitativi.

Nell'ultimo decennio si è sviluppata una nuova tecnica genetica che permette di superare il divario tra quantitativo e qualitativo, raccogliendo informazioni quantitative sui parenti dei soggetti a cui è stata fatta una diagnosi qualitativa di disturbo cognitivo. Il metodo si chiama analisi DF degli estremi, dal nome dei suoi ideatori, DeFries e David W. Fulker dell'Istituto di genetica comportamentale dell'Università del Colorado.

Nel caso della dislessia, l'analisi opera con misurazioni quantitative della lettura in gemelli monozigoti ed eterozigoti di soggetti dislessici, e non si basa su una diagnosi condivisa di dislessia. Se i problemi di lettura sono condizionati dalle stesse influenze genetiche che determinano la variabilità delle prestazioni di lettura di soggetti normali, allora i punteggi relativi alla lettura dei gemelli monozigoti di bambini di-

GEMELLI MONOZIGOTI
GEMELLI ETEROZIGOTI
CORRELAZIONE TRA GEMELLI (SOMIGLIANZA CRESCENTE)
ABILITÀ VERBALE
ABILITÀ SPAZIALE
1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
INFANZIA ADOLESCENZA GIOVINEZZA ETÀ MATURA VECCHIAIA

Gli studi condotti sui gemelli hanno esaminato le correlazioni nelle abilità verbali (*in alto*) e spaziali (*in basso*) di gemelli monozigoti ed eterozigoti. Il confronto dei risultati ottenuti in questi studi separati dimostra una sostanziale influenza genetica su specifiche capacità cognitive in tutte le età, dall'infanzia alla vecchiaia; per tutti i gruppi di età, i punteggi dei gemelli monozigoti sono più simili fra loro rispetto a quelli dei gemelli eterozigoti. Questi dati sembrano contraddire la tradizionale teoria secondo cui l'influenza dei geni svanisce con il tempo.

Il Colorado Adoption Project, che ha seguito i soggetti nel tempo, ha rivelato che, sia per quanto riguarda le abilità verbali (*in alto*) sia per quanto riguarda le abilità spaziali (*in basso*), i bambini adottati finiscono per somigliare ai loro genitori biologici (*colonne in bianco*) tanto quanto i bambini allevati dai genitori biologici (*colonne in grigio*). Al contrario, i figli adottati non finiscono per somigliare ai loro genitori adottivi (*colonne in nero*). Se ne deduce che la somiglianza familiare per quanto riguarda le capacità cognitive è dovuta soprattutto a fattori genetici e non all'ambiente.

slessici dovrebbero essere più vicini a quelli del gruppo dei disabili rispetto a quelli dei gemelli eterozigoti. (Un singolo gene può produrre diversi effetti se in una popolazione ricorre in più di una forma, così che due persone ne possono ereditare versioni un po' diverse. Esempi di questi geni variabili sono quelli che controllano il colore degli occhi e la statura.)

Risulta che i gemelli monozigoti di soggetti dislessici, presi come gruppo, in queste prove quantitative hanno prestazioni quasi altrettanto basse dei dislessici, mentre i gemelli eterozigoti fanno molto meglio rispetto al gruppo dei dislessici, anche se hanno prestazioni notevolmente peggiori del resto della popolazione. Quindi, i geni che influenzano le difficoltà di lettura possono essere di fatto gli stessi che determinano la dimensione quantitativa dell'abilità di lettura misurata in questo studio. L'analisi DF degli estremi fa pensare anche che circa metà della differenza nei punteggi di lettura tra i dislessici e la popolazione generale si possa spiegare geneticamente.

Per quanto riguarda le difficoltà di lettura, potrebbe allora esserci un legame genetico tra la normalità e l'anormalità, anche se questo non significa che si debba trovare un analogo legame per altre disfunzioni. È possibile che l'incapacità di leggere rappresenti l'estremo di un intervallo continuo di abilità di lettura, e non un disturbo a sé stante: la dislessia potrebbe essere quantitativamente anziché qualitativamente diversa dalla normale abilità di lettura. Ne consegue che, se si trova un gene coinvolto nel disturbo della lettura, lo stesso gene sarà probabilmente associato alla normale variazione nell'abilità di lettura. La verifica definitiva si avrà con l'identificazione di uno specifico gene associato all'abilità o al disturbo nella lettura. Noi e altri ricercatori siamo ormai prossimi a scoprire questo gene.

I punteggi nella lettura ottenuti da gemelli fanno ritenere che esista un possibile legame genetico tra abilità di lettura normale e anormale. In un gruppo di membri scelti a caso di coppie di gemelli (*in alto*), una piccola frazione di bambini era affetta da dislessia (*verde*). I gemelli monozigoti (*al centro*) ed eterozigoti (*in basso*) dei bambini dislessici avevano punteggi inferiori a quelli del gruppo scelto a caso, con i gemelli monozigoti che ottenevano risultati peggiori di quelli dei gemelli eterozigoti. Fattori genetici, quindi, sono coinvolti nei disturbi della lettura. Gli stessi geni che influenzano la dislessia sono forse alla base delle differenze nella normale abilità di lettura.

A caccia di geni

Finora abbiamo limitato la nostra analisi alla genetica quantitativa, una disciplina che misura l'ereditarietà dei tratti indipendentemente dal tipo e dal numero dei geni coinvolti. Per avere informazioni sui geni stessi, i ricercatori devono rivolgersi alla genetica molecolare: ed è quello che fanno sempre più spesso. Se si riuscisse a identificare i geni che hanno a che fare con il comportamento e a caratterizzare le proteine codificate da quei geni, diventerebbe possibile intervenire in modo nuovo sulle disfunzioni.

La ricerca sui topi e sui moscerini della frutta è riuscita a identificare singoli geni collegati all'apprendimento e alla percezione spaziale, e indagini sulle variazioni naturali nelle popolazioni umane hanno permesso di individuare mutazioni in singoli geni che sono all'origine di un ritardo mentale generale. Ne sono esempio i geni per la fenilchetonuria e per la sindrome del cromosoma X fragile, entrambi causa di ritardo mentale. Anche difetti in singoli geni associati alla distrofia muscolare di Duchenne, alla sindrome di Lesch-Nyhan, alla neurofibromatosi di tipo 1 e alla sindrome di Williams sono forse collegabili alle peculiari disfunzioni cognitive collegate a queste malattie.

In effetti, sono note più di 100 mutazioni in singoli geni che danneggiano lo sviluppo cognitivo. D'altra parte, il normale funzionamento cognitivo è quasi sicuramente orchestrato dalla cooperazione perfettamente concertata di numerosi geni, anziché da singoli geni che operano isolatamente. Si ritiene che questi geni cooperanti incidano sull'attività cognitiva in modo probabilistico, non deterministico: essi vengono chiamati loci di tratti quantitativi, o QTL (*quantitative trait loci*). Il nome, che si applica ai geni coinvolti in una dimensione complessa, quale è appunto l'attività cognitiva, sottolinea la natura quantitativa di certi tratti fisici e comportamentali. Sono già stati identificati QTL per malattie quali il diabete, l'obesità e l'ipertensione, oltre che per problemi comportamentali che hanno a che fare con la sensibilità alle droghe e la tossicodipendenza.

Ma trovare QTL è molto più difficile che identificare mutazioni in singoli geni responsabili di alcuni disturbi cognitivi. Fulker ha affrontato il problema elaborando un metodo, simile all'analisi DF degli estremi, in cui certe variazioni note nel DNA sono correlate a differenze tra fratelli in tratti quantitativi. Essendo più facile individuare gli effetti genetici agli estremi di una dimensione, il metodo funziona meglio quando è noto che almeno un membro di ciascuna coppia di fratelli si trova all'estremità della variazione di un determinato tratto. Alcuni ricercatori del Colorado Learning Disabilities Research Center dell'Università del Colorado sono stati i primi a utilizzare questa tecnica, detta legame QTL, per localizzare un QTL per la dislessia. La scoperta venne pubblicata nel 1994 dagli studiosi di Boulder e dai loro collaboratori dell'Università di Denver e del Boys Town National Research Hospital di Omaha.

Come molte tecniche della genetica molecolare, il legame QTL funziona identificando differenze in marcatori del DNA: segmenti di DNA di cui è nota la posizione sui cromosomi e che possono variare in una certa misura da persona a persona. Le differenti versioni di un marcatore, come le versioni differenti di un gene, sono chiamate alleli. Dato che gli esseri umani hanno due copie di tutti i cromosomi (a eccezione dei cromosomi X e Y che determinano il sesso

nei maschi), essi possiedono due alleli per ciascun marcatore del DNA. I fratelli, quindi, possono condividere uno, due o nessun allele di un marcatore. In altri termini, per ciascun marcatore i fratelli possono essere come gemelli monozigoti (che condividono entrambi gli alleli), come fratelli eterozigoti (che condividono metà dei loro alleli) o come fratelli adottivi (che non condividono alleli).

I ricercatori che hanno scoperto il QTL per la dislessia identificavano un membro dislessico di una coppia di gemelli e poi ottenevano punteggi di lettura per il «cogemello». Se i punteggi di lettura dei cogemelli erano peggiori quando questi condividevano con i loro gemelli dislessici alleli di un particolare marcatore, allora era probabile che quel marcatore si trovasse vicino a un QTL per la dislessia nella stessa regione cromosomica. I ricercatori hanno individuato uno di questi marcatori sul braccio corto del cromosoma 6 in due campioni indipendenti, uno di gemelli eterozigoti e uno di fratelli non gemelli; in seguito, altri studiosi hanno ottenuto lo stesso risultato.

È importante notare che, mentre questi studi sono serviti a determinare la localizzazione di un gene (o di geni) coinvolti nel disturbo della lettura, il vero e proprio gene (o geni) non è stato ancora caratterizzato. Questa distinzione dà un po' l'idea di dove sia arrivata attualmente la genetica dell'attività cognitiva: a un passo da un nuovo livello di scoperte. L'identificazione dei geni che influiscono su specifiche abilità cognitive rivoluzionerà le teorie sulla mente. La genetica molecolare, anzi, avrà conseguenze di vasta portata per lo studio di tutto il comportamento umano.

Due modelli illustrano il modo in cui la genetica può incidere sulla dislessia. Nella teoria classica (*in alto*), una singola variante, o allele, di un gene è in grado di provocare il disturbo; tutti coloro che hanno quell'allele divengono dislessici (*grafico*). Ma i dati fanno propendere per un modello diverso (*in basso*), in cui un singolo allele non può produrre da solo il disturbo. Invece l'abbassamento dei punteggi e l'aumento del rischio di disfunzione possono derivare dall'azione combinata dell'attività di varianti di diversi geni.

Sarà presto possibile studiare le connessioni tra diversi tratti e quelle tra comportamenti e meccanismi biologici. Si potrà meglio seguire il corso evolutivo degli effetti genetici e definire con maggiore precisione le interazioni che intercorrono tra i geni e l'ambiente.

La scoperta di geni coinvolti in disturbi e disfunzioni aiuterà anche a studiare terapie più efficaci e a identificare le persone a rischio prima della comparsa dei sintomi. In realtà, questo è già avvenuto nel caso dell'allele Apo-E4, associato alla demenza e al declino cognitivo in età avanzata. Naturalmente, le nuove scoperte su specifici geni potrebbero anche sollevare nuovi problemi: per esempio, favorire la tentazione di bollare in modo pregiudiziale le persone colpite e di discriminarle. La ricerca genetica, inoltre, solleva sempre il timore che i marcatori del DNA vengano usati dai genitori per «progettare» i propri figli.

Proprio per questo, occorre continuare a sottolineare che gli effetti genetici non implicano un determinismo genetico e non escludono l'intervento ambientale. Forse qualche lettore troverà criticabili le nostre teorie, ma noi riteniamo che i benefici dell'identificazione dei geni legati all'attività cognitiva supereranno di gran lunga i possibili abusi.

RISPOSTE AI TEST: VERBALE: 1a: secco; 1b: pungente SPAZIALE: 1. 2. b,c; 3. a,c,d; 4. a,b,f

ROBERT PLOMIN e JOHN C. DEFRIES collaborano da più di vent'anni. Plomin, che fu con DeFries all'Università del Colorado a Boulder dal 1974 al 1986, lavora attualmente all'Institute of Psychiatry di Londra, dove è professore di genetica comportamentale e vice direttore del Social, Genetic and Developmental Psychiatry Research Centre. DeFries dirige l'Istituto di genetica comportamentale e il Learning Disabilities Research Center dell'Università del Colorado. Il Colorado Adoption Project, che prosegue tuttora, fu intrapreso dagli autori nel 1975, e ha già prodotto tre raccolte di risultati e oltre un centinaio di pubblicazioni scientifiche. Plomin e DeFries sono anche i principali autori del volume *Behavioral Genetics*, attualmente alla sua terza edizione.

PLOMIN ROBERT e McCLEARN GERALD E. (a cura), *Nature, Nurture and Psychology*, American Psychological Association, Washington, D.C., 1993.

DEFRIES J. C. e ALARCÓN MARICELA, *Genetics of Specific Reading Disability* in «Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews», 2, pp. 39-47, 1996.

PLOMIN ROBERT, DEFRIES JOHN C., McCLEARN GERALD E. e RUTTER MICHAEL, *Behavioral Genetics*, 3° edizione, W. H. Freeman, 1997.

GRIGORENKO E. L., WOOD F. B., MEYER M. S. e altri, *Susceptibility Loci for Distinct Components of Developmental Dyslexia on Chromosomes 6 and 15* in «American Journal of Human Genetics», 60, pp. 27-39, 1997.

LENHOFF HOWARD M., WANG PAUL P., GREENBERG FRANK e BELLUGI URSULA, *Williams Syndrome and the Brain* in «Scientific American», 277, n. 6, dicembre 1997.

La fusione nucleare e la «macchina Z»

Un nuovo dispositivo dal nome fantascientifico ha consentito di mettere a punto un metodo alternativo per innescare la fusione controllata mediante potenti impulsi di raggi X di pochi nanosecondi

di Gerold Yonas

Randy Montoya, Sandia National Laboratories

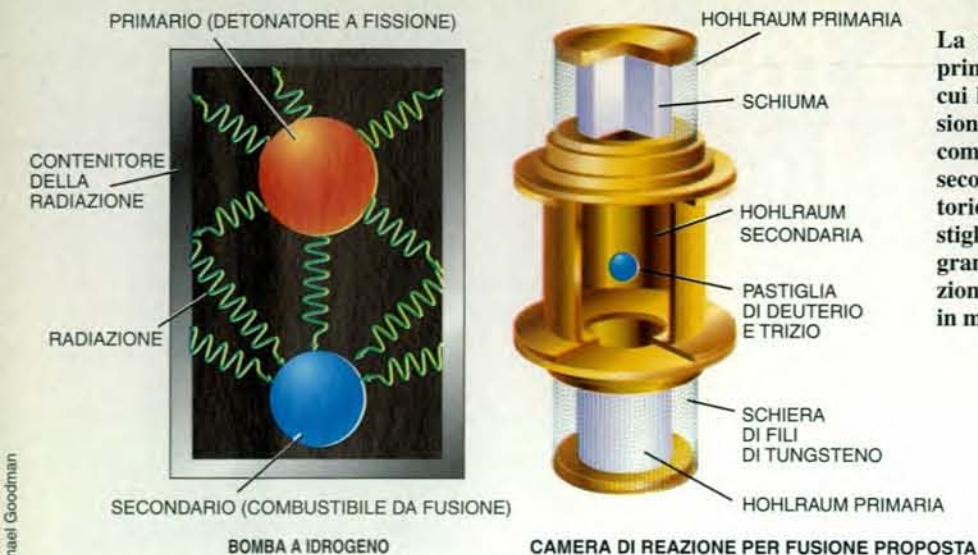
L'accensione della macchina Z genera questa immagine spettacolare. Le linee di trasmissione primarie della macchina sono immerse in acqua per mantenerle isolate. Una piccola frazione dell'enorme energia impiegata per l'accensione del dispositivo sfugge alla superficie dell'acqua sotto forma di scariche elettriche. È un fenomeno che dura pochi microsecondi. Una macchina fotografica automatica, con l'otturatore completamente aperto, è in grado di registrare le rapide scariche come filigrana di tracce brillanti.

Ci sono cose che non cambiano mai. O cambiano? Nel 1978 la ricerca sulla fusione nucleare era in corso da quasi trent'anni, e si era riusciti a innescare il processo solamente nella bomba all'idrogeno. Eppure, a quell'epoca dichiarai proprio su «Scientific American» che una prova sperimentale della possibilità di innescare la fusione era lontana meno di dieci anni e che, raggiunta tale tappa, si sarebbe potuto passare alla costruzione di impianti per la produzione di energia basati sulla fusione termonucleare (si veda l'articolo *Energia da fusione con fasci di particelle* in «Le Scienze» n. 125, gennaio 1979). La motivazione che ci spingeva in queste ricerche, allora come oggi, era il fatto che, con la fusione, un ditale di idrogeno pesante liquido sarebbe in grado di produrre tanta energia quanto 20 tonnellate di carbone.

La scienza insegue il Sacro Graal della fusione ormai da quasi 50 anni. L'innesco, si dice, è ancora «lontano 10 anni». La crisi energetica degli anni settanta è ormai dimenticata, e la pazienza dei nostri sostenitori è a dir poco al limite. Meno di tre anni or sono, ai Sandia National Laboratories, meditavo se porre fine a un lavoro che era ancora lontano di un fattore 50 dalla potenza necessaria per accendere il fuoco della fusione. Da allora, però, il nostro successo nel generare potenti impulsi di raggi X con un dispositivo innovativo chiamato «macchina Z» mi ha restituito la fiducia nella possibilità di innescare la fusione in laboratorio entro 10 anni.

La bomba all'idrogeno è la dimostrazione che il fenomeno della fusione può accadere. In una bomba H, la radiazione prodotta dall'esplosione di una bomba atomica a fissione fa da «innesco», riscaldando e comprimendo un contenitore abbastanza per «accendere» e bruciare l'idrogeno al suo interno. Sembra facile, ma innescare e mantenere un processo di fusione significa forzare i nuclei di due forme di idrogeno - il deuterio e il trizio - a fondersi, per formare nuclei di elio, liberando un'enorme quantità di energia. La compressione deve avvenire secondo una simmetria quasi perfetta, in modo da comprimere uniformemente l'idrogeno ad altissime densità.

Nei primi decenni di ricerche sulla fusione, la prospettiva di mettere a punto una versione di laboratorio della bomba H sembrava remota. Gli sforzi per «controllare» la fusione erano invece orientati verso il principio del confinamento magnetico, in cui un potente campo magnetico intrappola un plasma caldo di deuterio e trizio abbastanza a lungo da avviare il processo di fusione. Nel 1991, sfruttando questa tecnica, fu raggiunta la fusione con il Joint European Torus e più tardi anche con il Tokamak Fusion Test Reactor

Michael Goodman

La fusione a confinamento inerziale sfrutta i princìpi della bomba a idrogeno (*a sinistra*), in cui la radiazione prodotta da una bomba a fissione (detta primario) comprime e riscalda il combustibile per la fusione, che è contenuto nel secondario. Il minuscolo equivalente di laboratorio (*a destra*) si propone di immergere la pastiglia di combustibile, delle dimensioni di un grano di pepe, in un bagno uniforme di radiazione, e di concentrare la potenza sulla pastiglia in modo che questa imploda uniformemente.

(TFTR) della Princeton University. Il passo successivo su questa strada è l'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), un progetto che coinvolge Stati Uniti, Unione Europea, Giappone e Russia. Il costo e le difficoltà tecniche di ITER, però, insieme con il disaccordo su dove dovrebbe essere costruito, hanno già rallentato i lavori nella fase di progettazione.

Già all'inizio degli anni settanta, svariati ricercatori di Los Alamos, del Lawrence Livermore e dei Sandia National Laboratories avevano rivolto la loro attenzione a un altro modo di ottenere la fusione. Nella tecnica del confinamento inerziale, schematizzata dalla bomba H, l'idea è di utilizzare la radiazione per comprimere una piccola massa di idrogeno, il combustibile. Mentre, però, la bomba H sfrutta la radiazione prodotta da una bomba atomica a fissione, i primi tentativi di ottenere la fusione inerziale in laboratorio hanno impiegato intensi fasci laser o elettronici per fare implodere il combustibile.

Allora si riteneva che la potenza necessaria per innescare la fusione fosse molto inferiore rispetto al valore che oggi conosciamo. Dal 1978, quel valore è cresciuto fino a un milione di joule liberati in 10 nanosecondi all'esterno di una pastiglia di combustibile delle dimensioni di un grano di pepe: una potenza di 100 terawatt, pari alla condensazione in una frazione di secondo dell'energia consumata da una mezza dozzina di abitazioni per diverse ore. Per raggiungere questo scopo, noi ai Sandia e alcuni scienziati dell'ex Unione Sovietica cominciammo a dirigere la ricerca verso una nuova tecnologia detta a «potenza impulsata».

In un sistema che sfrutta la potenza impulsata, l'energia elettrica è immagazzinata in condensatori e quindi liberata sotto forma di brevi impulsi, che vengono resi ancora più brevi per aumentarne la potenza e compressi nello spazio per aumentare la densità di potenza. Questi lampi di energia elettromagnetica vengono successivamente convertiti in intensi fasci di particelle cariche o utilizzati per attivare altri dispositivi. I sistemi laser per la fusione, invece, si avviano con impulsi elettrici più lunghi, che vengono amplificati e modellati nel sistema laser stesso. La potenza impulsata era vista come un'interessante alternativa ai laser per la sua provata efficienza e per i costi contenuti.

Questa tecnologia ha avuto avvio nel 1964 per iniziativa della Atomic Energy Authority britannica e a metà degli anni sessanta è stata sviluppata in Unione Sovietica, nel Regno Unito e negli Stati Uniti, sotto l'egida dei dicasteri dell'energia e della difesa. La tecnica, però, riusciva a generare solo potenze limitate, una circostanza che la sfavorì nella corsa alla fusione. Il suo impiego principale fu, piuttosto, quello di simulare, in laboratorio, i possibili effetti delle radiazioni sugli armamenti.

Nel 1973, ai Sandia National Laboratories e sotto la mia direzione, cominciarono a essere finanziati programmi per la fusione inerziale, ma anche altri laboratori statunitensi e l'Istituto Kurčatov, sotto la guida di Leonid Rudakov, si mossero in quella direzione. Da allora, abbiamo accumulato un'infinità di nuove acquisizioni sulla tecnologia per ottenere la potenza sufficiente ad avviare la fusione e anche sulla potenza necessaria, sia mediante laser sia mediante potenza impulsata. Decenni di esperimenti effettuati con potenti fasci laser e attentamente analizzati hanno confermato e perfezionato i codici digitali per la progettazione delle pastiglie di combustibile. Attualmente le simulazioni indicano che per ottenere l'ignizione sono necessari quasi 500 terawatt e 2 milioni di joule di radiazione alla temperatura di 3 milioni di gradi per una durata di quattro nanosecondi.

I laser possono arrivare a tanto. Dopo 13 anni di ricerche condotte con il laser Nova da 30 chilojoule, il Lawrence Livermore sta costruendo un laser molto più potente, situato proprio nel cuore della National Ignition Facility (NIF). Se raggiungerà il suo scopo, la NIF produrrà almeno tanta energia da fusione quanta ne avrà liberata il laser per innescare il processo, ma questo non sarà sufficiente nemmeno ad avvicinare l'energia spesa per alimentare il laser, che è circa 100 volte superiore. In effetti, arrivare alla meta significa anche ottenere un alto rendimento, ovvero l'energia prodotta nella fusione deve essere molto superiore a quella immessa nel laser. La NIF farà il prossimo passo verso un rendimento elevato, ma l'attuale tecnologia laser è eccessivamente costosa per superare questi limiti.

I raggi X si generano quando un plasma prodotto da molti fili di tungsteno collassa su uno strato di carbonio e deuterio posto sull'asse *z* di una macchina a reostrizione. Le viste frontali (da sinistra a destra a intervalli di tre nanosecondi) mostrano raggi X con energie superiori a 800 elettronvolt (*in alto*) e intorno ai 200 elettronvolt (*in basso*).

Sandia National Laboratories

La potenza prodotta con la reostrizione a schiere di fili è aumentata dal 1970 al 1995. In particolare, i rapidi progressi degli ultimi due anni sono legati all'evoluzione degli esperimenti e al miglioramento dei modelli digitali che descrivono il comportamento dei plasmi. A questo proposito, i punti rossi mostrano l'aumento della potenza di calcolo.

Michael Goodman

Il ritorno della macchina Z

Soltanto pochi anni fa, nonostante 25 anni di sforzi, il mio gruppo ai Sandia era ancora lontano dalla prospettiva di ottenere la fusione con la tecnologia della potenza impulsata. In queste condizioni, non è stato facile decidere di continuare il programma, ma recentemente la nostra perseveranza è stata premiata. Innanzitutto, la potenza prodotta è cresciuta in misura enorme: a metà degli anni sessanta, con la nostra tecnica si produceva un millesimo di terawatt di radiazione; recentemente, negli esperimenti con la macchina Z, abbiamo raggiunto i 290 terawatt. Riteniamo di poter ottenere fusione nucleare ad alto rendimento con impulsi di radiazione da 1000 terawatt, e dunque ci siamo avvicinati a un fattore 3 da questo limite.

Altrettanto importante è stato il progresso compiuto nel concentrare l'energia sulla minuscola pastiglia di combustibile. Negli anni settanta iniziammo a lavorare con fasci di elettroni, e negli anni ottanta ci spostammo sui fasci di ioni, che dovrebbero riscaldare il bersaglio a temperature più elevate. È tuttavia difficile controllare e focalizzare particelle cariche in modo da ottenerne fasci ben collimati.

I raggi X hanno, in linea di principio, una caratteristica assai più promettente: essi possono riempire uniformemente lo spazio intorno a un contenitore, proprio come il calore del forno avvolge un tacchino. La prospettiva di avviare la fusione utilizzando sistemi a potenza impulsata per creare intensi lampi di raggi X in una piccola camera di reazione è oggi emersa dalla ricerca su un concetto, detto «reostrizione Z», che risale agli anni cinquanta, agli albori della ricerca sul confinamento magnetico. La reostrizione è un fenomeno che si verifica in un conduttore elettrico fluido e, essenzialmente, consiste in una contrazione della sezione del conduttore dovuta alla reciproca attrazione esercitata dai diversi filetti di fluido percorsi da corrente.

In origine la reostrizione Z era un tentativo di innescare la fusione facendo passare una forte corrente elettrica attraverso un campione di deuterio allo stato gassoso. La corrente ionizza il gas e genera al tempo stesso un campo magnetico che «pizzica» il risultante plasma ad alta temperatura e densità lungo il cammino percorso dalla corrente, convenzionalmente considerato come asse *z*.

La tecnica però si dimostrò incapace di comprimere il plasma in modo uniforme: le instabilità del fluido separano il plasma in bolle, che rendono la reostrizione Z inadatta ad alimentare la fusione. La compressione del plasma, tuttavia, genera anche raggi X, con energia fino a 1000 elettronvolt. Per 30 anni la ricerca sulla reostrizione Z si è concentrata sull'obiettivo di focalizzare la radiazione X prodotta di energia inferiore al chiloelettronvolt, usandola per sottoporre a prova la risposta dei materiali e dell'elettronica alla radiazione prodotta da ordigni nucleari.

La reostrizione Z ha oggi imboccato una nuova strada per innescare la fusione inerziale. Nel corso degli ultimi tre anni abbiamo dimostrato che, combinando l'efficienza e il basso costo della potenza impulsata veloce con la semplicità e l'efficienza della reostrizione Z come fonte di radiazione, dovremmo ottenere l'ignizione utilizzando raggi X di energia inferiore al chiloelettronvolt per comprimere una pastiglia di combustibile. Inoltre, l'accessibilità economica di una sorgente di raggi X a potenza impulsata dovrebbe permetterci di andare oltre, fino a un'efficiente accensione del combustibile e a un alto rendimento.

Per avviare la fusione, la reostrizione Z deve avvenire in una camera radiativa (o *Hohlraum*, il termine tedesco usato per «cavità») che intrappoli i raggi X. In un sistema che abbiamo studiato, la reostrizione Z verrebbe disposta in una hohlraum primaria, mentre il combustibile sarebbe contenuto in una hohlraum secondaria, più piccola. Usando un'altra tecnica, la pastiglia sarebbe situata in una schiuma plastica a bassa densità al centro della zona dove deve avvenire la reostrizione nella hohlraum primaria. La chiave del processo consiste nel fatto che i raggi X generati quando si verifica la reostrizione, sia sull'asse *z* sia all'interno della schiuma, verrebbero contenuti dalla hohlraum in modo da circondare uniformemente il combustibile, proprio come il contenitore di una bomba H trattiene la radiazione prodotta dalla bomba atomica di innesco. Esperimenti condotti negli ultimi tre anni mostrano che entrambi i metodi dovrebbero funzionare, poiché ora siamo in grado di produrre una reostrizione Z che rimane uniforme e intatta sufficientemente a lungo da raggiungere il suo obiettivo.

Trovare il segreto

Che cosa c'è oggi di diverso rispetto al lungo periodo preliminare di lenti progressi? Come Thomas Edison, che aveva provato un migliaio di materiali prima di trovare la strada buona per la lampadina, abbiamo scoperto che l'instabilità della reostrizione Z può essere ridotta di molto estraendo l'energia rapidamente, nella forma di un breve impulso di raggi X, prima che le instabilità distruggano la geometria. In effetti, l'energia della reostrizione viene rimossa prima che si trasformi in rapidi movimenti del plasma a piccola scala.

L'instabilità che rende vana la reostrizione è lo stesso fenomeno che fa sì che l'aceto, per quanto versato attentamente su un velo d'olio, meno denso, formi gocce irregolari sul fondo di un'insalatiera. Questa instabilità è benefica per l'insalata, quando viene mescolata, ma costituiva una barriera per ottenere la fusione inerziale. Tuttavia le simulazioni numeriche compiute da Darrell Peterson a Los Alamos e da Melissa R. Douglas ai Sandia hanno permesso di scoprire

La concentrazione sequenziale di potenza in un dispositivo a potenza a impulsi ha inizio in una schiera circolare di 36 generatori Marx, in cui 90 000 volt caricano un condensatore di 5000 metri cubi in due minuti. Gli impulsi elettrici di 36 moduli entrano in una sezione isolata ad acqua dei condensatori intermedi, dove vengono compressi a una durata di 100 nanosecondi. Passando attraverso un interruttore a gas a innesco laser che sincronizza i 36 impulsi a meno di un nanosecondo, gli impulsi combinati viaggiano verso la schiera di fili (*a sinistra*) lungo quattro linee di trasmissione magnetiche isolate che minimizzano le perdite di energia. La reostrizione Z (*a fianco*) ha luogo quando migliaia di ampere di corrente elettrica attraversano fili del diametro pari a un decimo di un capello. Le illustrazioni nella pagina a fronte mostrano come i raggi X prodotti dal dispositivo possano far implodere una pastiglia di combustibile e innescare la fusione in una hohlraum schematizzata. Nell'acceleratore X-1 proposto, si raggiungerebbe l'implosione, in circa 10 nanosecondi, di una pastiglia di combustibile delle dimensioni del punto alla fine di questa didascalia.

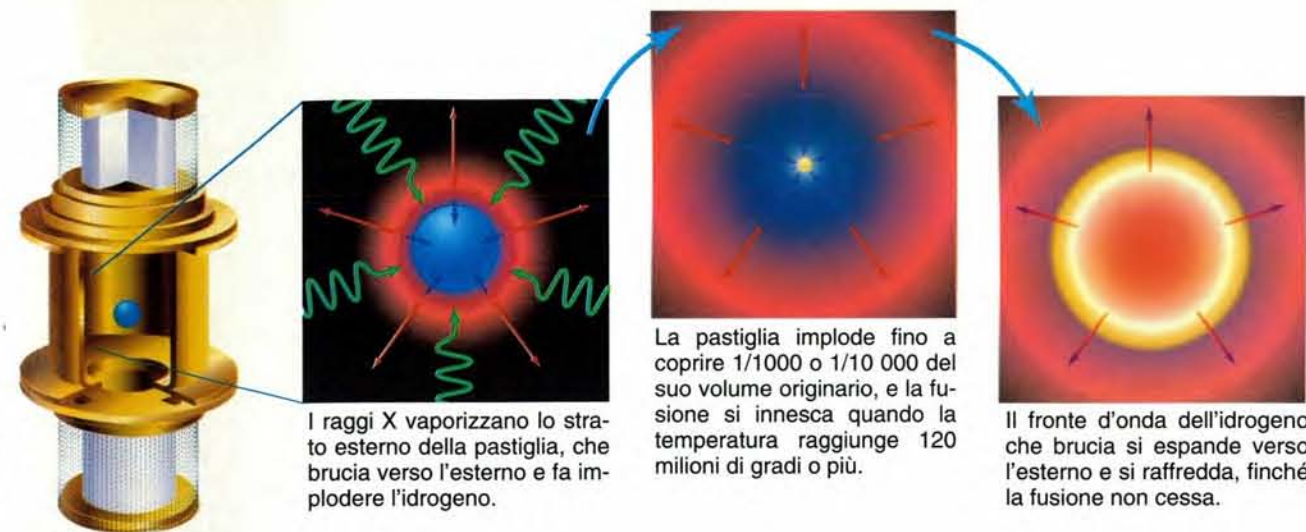
che quanto più il plasma iniziale è uniforme, tanto più uniforme dovrebbe essere la reostrizione quando è in asse e produce raggi X.

Sono stati provati diversi metodi per rendere il plasma più uniforme, come l'uso di sottili gusci metallici o bolle cave di gas per condurre la corrente elettrica, ma nessuno di questi tentativi ha sortito grande successo. Il passo avanti è arrivato ai Sandia nel 1995, quando Thomas W. L. Sanford, usando molti sottili fili di alluminio, e Christopher Deeney e Rick Spielman, con anche 400 fili di tungsteno, sono riusciti a ottenere l'uniformità necessaria. La reostrizione Z a schiere di fili fu ideata per la prima volta sul finire degli anni settanta presso la Physics International, una società privata interessata alla produzione di raggi X come sorgente per testare gli effetti delle radiazioni in laboratorio, per migliorare l'emissione di energia dei raggi X da uno a cinque chiloelettronvolt. Ma gli acceleratori a bassa corrente allora disponibili non potevano liberare abbastanza potenza elettrica da far implodere un gran numero di piccoli fili.

Dopo gli esperimenti del 1995, Barry M. Marder dei Sandia suggerì che la chiave fosse avere un gran numero di fili disposti in modo che, quando esplodevano al passaggio della corrente, si unissero a creare un guscio di plasma in implosione, quasi uniforme. I successivi esperimenti condotti ai Sandia hanno dimostrato che il nucleo caldo centrale desiderato si produce dopo che l'intero guscio implode su un cilindro di schiuma disposto lungo l'asse *z*. Inoltre, esperimenti effettuati alla Cornell University indicano che ciascun filo non può trasformarsi subito completamente in plasma, come indicavano le simulazioni di Marder. Invece, può sussistere un nucleo freddo di filo, circondato dal plasma, che permette al flusso di corrente di continuare per un certo tempo e di aumentare l'efficienza della reostrizione.

Questi progressi ebbero inizio tre anni fa ai Sandia con l'acceleratore Saturn, in grado di generare correnti da 10 milioni di ampere e sono continuati, dall'ottobre 1996, sulla «macchina Z», da 20 milioni di ampere, che attualmente produce i più potenti ed energetici impulsi di raggi X del mondo. In un tipico esperimento, siamo in grado di generare 2 milioni di joule di raggi X in pochi nanosecondi, per una potenza di oltre 200 terawatt.

In una serie di esperimenti iniziati nel novembre 1997, abbiamo aumentato la potenza dei raggi X prodotti del 45 per cento, fino a 290 terawatt, usando una schiera di fili a doppio nido. La corrente vaporizza la schiera esterna, e il campo magnetico spinge il materiale vaporizzato verso l'interno. Le parti che si muovono più velocemente colpiscono la schiera interna e vengono rallentate, permettendo alle parti più lente di catturare e trascinare materiale dentro la schiera interna. Questa geomeria riduce le instabilità dell'implosione e quando il materiale vaporizzato collide lungo l'asse *z* genera un impulso di raggi X più breve di quello prodotto da una singola schiera. La schiera a doppio nido ha prodotto una temperatura di radiazione di 1,8 milioni di gradi.

In altri esperimenti sulla reostrizione Z, condotti al Livermore da Arthur Toor, gli strati di schiuma che circondavano un tubo di berillio in una singola schiera hanno prodotto un'implosione del plasma più lenta e simmetrica, il che ha generato temperature più elevate nella hohlraum. Ci sono voluti 40 anni per guadagnare 40 terawatt di potenza dei raggi X da un dispositivo a reostrizione Z. Ora, in soli tre anni, ci siamo avvicinati al nostro obiettivo finale di 1000 terawatt e 16 milioni di joule di raggi X, che dovrebbero produrre la temperatura di tre milioni di gradi della hohlraum necessaria per avere fusione ad alto rendimento. Sapevamo che la potenza impulsata sarebbe stata più efficiente e meno costosa del confinamento laser, e in effetti il nostro acceleratore Z genera ora un'energia, nella banda dei raggi X, equivalente al 15 per cento dell'energia elettrica impiegata per attivarlo; per il laser Nova del Lawrence Livermore, l'efficienza equivalente è dello 0,1 per cento. Qualche miglioramento progettuale potrebbe far aumentare tale valore fino allo 0,5 per cento, ma l'inefficienza intrinseca del processo di alimentazione del laser impedisce a questi dispositivi di raggiungere efficienze elevate.

I raggi X vaporizzano lo strato esterno della pastiglia, che brucia verso l'esterno e fa implodere l'idrogeno.

La pastiglia implode fino a coprire 1/1000 o 1/10 000 del suo volume originario, e la fusione si innesca quando la temperatura raggiunge 120 milioni di gradi o più.

Il fronte d'onda dell'idrogeno che brucia si espande verso l'esterno e si raffredda, finché la fusione non cessa.

Il fattore tre mancante

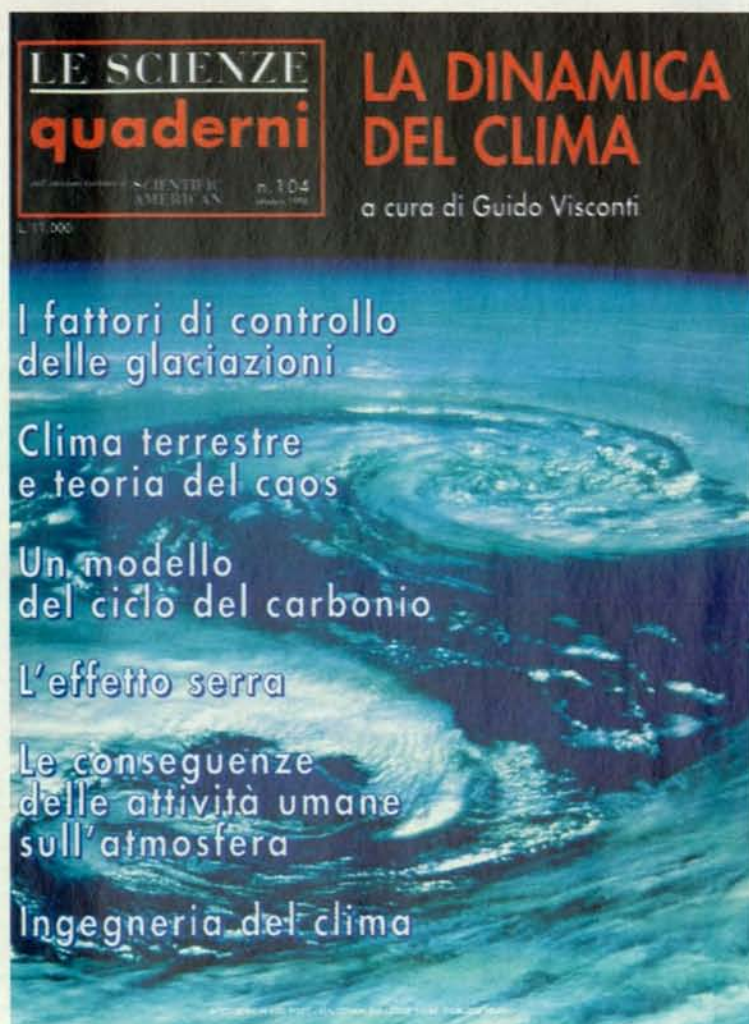
Questi intensi impulsi di raggi X hanno numerose applicazioni. Le energie e le potenze ottenute con la macchina Z consentono anche di effettuare misurazioni di laboratorio delle proprietà dei materiali e di condurre studi sul trasporto della radiazione a densità e temperature che, in precedenza, potevano essere raggiunte solamente nelle esplosioni nucleari sotterranee. Questi esperimenti e i prodotti della fusione che sarebbero generati da un dispositivo capace di raggiungere correnti più elevate sono parte del programma di gestione delle riserve del Department of Energy, che mira a garantire la sicurezza e il regolare funzionamento delle vecchie armi nucleari qualora gli Stati Uniti dovessero servirsene in futuro.

Vi sono anche applicazioni in campo astrofisico, poiché le sorgenti di raggi X alimentate dalla macchina Z producono plasmi simili a quelli che si trovano negli strati più esterni delle stelle. Grazie ai dati ottenuti nel 1996 da Paul T. Springer del Lawrence Livermore negli esperimenti condotti con la reostrizione Z mediante l'acceleratore Saturn, oggi si può comprendere meglio la luce prodotta da un certo tipo di stelle pulsanti, le variabili Cefeidi. Ci aspettiamo che nuovi dati possano contribuire a svelare il mistero di straordinari eventi stellari come le supernove. Infine, i plasmi di laboratorio offrono anche potenziali opportunità per nuovi studi di fisica atomica e sui laser a raggi X.

Come sorgente di raggi X, la reostrizione Z presenta notevole efficienza e grande riproducibilità; esperimenti ripetuti raggiungono lo stesso ordine di grandezza di energia e potenza dei raggi X, anche se non possiamo prevedere esattamente che cosa accade. Ciò che possiamo prevedere è la scala: ogni volta che raddoppiamo la corrente, l'energia dei raggi X aumenta di quattro volte, secondo una semplice legge quadratica. E, come previsto teoricamente per la radiazione termica, la temperatura della reostrizione aumenta secondo la radice quadrata della corrente. Se questa fisica si confermerà, un altro fattore tre di aumento della corrente - fino a 60 milioni di ampere - dovrebbe permetterci di raggiungere l'energia, la temperatura e la potenza necessarie per innescare la fusione e raggiungere un alto rendimento.

Quali questioni dovranno essere risolte prima di poter compiere quest'ultimo passo? La prima è se potremo stipare una corrente tripla nello stesso contenitore. La ragione per cui nella reostrizione Z è possibile ammassare un'enorme concentrazione di energia in piccole cavità fu scoperta quasi trent'anni fa all'Istituto Kurčatov, presso la Physics International e ai Sandia. Normalmente, i campi elettrici tendono a distruggere la corrente che li genera, ma un fenomeno chiamato isolamento magnetico fa sì che brevi, potenti impulsi elettrici possano essere trasmessi lungo un canale tra due superfici metalliche senza rotture e quasi senza perdite di energia. Il campo magnetico prodotto dall'impulso agisce in modo da contenere l'impulso stesso vincendo il campo elettrico che altrimenti provocherebbe la rottura. Negli esperimenti di reostrizione Z condotti nell'aprile di quest'anno da John L. Porter ai Sandia, un'apertura di 1,5 millimetri tra una schiera di fili e la circostante parete della hohlraum rimaneva aperta nonostante l'intensa radiazione, a causa dell'isolamento magnetico, permettendo alla temperatura della hohlraum di raggiungere 1,7 milioni di gradi.

Nel sottile spazio tra i fili e la parete della hohlraum vengono trasmessi 50 terawatt di potenza, e la densità di potenza raggiunge i 25 terawatt per centimetro quadrato. Se aumentiamo la potenza a 150 terawatt a 60 milioni di ampere, la densità di potenza arriverà a 75 terawatt per centimetro quadrato. Questo aumento fa sorgere nuovi problemi, poiché la pressione materiale sulle pareti del metallo sale a 1,5-3 milioni di atmosfere. Ma vi sono anche altre questioni: per esempio, se l'efficienza di conversione dei raggi X si manterrà allo stesso 15 per cento osservato a 20 milioni di ampere; se le instabilità rimarranno sotto controllo, e se potremo ottenere la simmetria e la forma dell'impulso radiativo sulla pastiglia che sono necessarie secondo le simulazioni al calcolatore.

Un altro passo importante è lo sviluppo di modelli predittivi. Le simulazioni bidimensionali attualmente disponibili hanno fornito un gran numero di conoscenze sulla fisica della reostrizione ma, anche se limitate alle due dimensioni, richiedono un'enorme potenza di calcolo. Simulazioni del completo carattere tridimensionale magnetico, idrodinamico e radiativo della reostrizione eccedono le attuali possibilità, ma i progressi nel calcolo ad alte prestazioni e nella visualizzazione dei raggi X stanno rapidamente avvicinandosi ai nostri progressi nella potenza irradiata. Nel 1998 abbiamo utilizzato il computer Janus alla velocità di 1800 miliardi di operazioni al secondo (1,8 teraflop). I nostri colleghi ai Sandia e a Los Alamos stanno sviluppando un modello digitale per simulare la fisica della reostrizione e il trasporto di radiazione alla pastiglia di combustibile. Con l'avvento di questi modelli, e grazie alla nuova generazione di supercalcolatori, ci aspettiamo di poter continuare i nostri rapidi progressi nello sviluppo della fusione mediante reostrizione Z.

Oggi, ai Sandia, speriamo di iniziare a progettare il prossimo grande passo. Alla fine di marzo abbiamo richiesto l'approvazione da parte del DOE per continuare il progetto del successore della macchina Z, la X-1. Questa nuova macchina dovrebbe essere in grado di produrre 16 megajoule di radiazione e, riteniamo, permetterci di raggiungere un alto rendimento. Valutarne il costo è prematuro, ma ci aspettiamo che si avvicinerà ai 400 milioni di dollari. È importante ricordare che la macchina Z, la X-1 e la National Ignition Facility sono ancora strumenti di ricerca. La macchina Z può raggiungere le condizioni necessarie per la fusione; la National Ignition Facility dovrebbe raggiungere l'innesco; e la macchina X-1, infine, dovrebbe poter innescare una fusione ad alto rendimento. Tuttavia, non ci aspettiamo che nessuno di questi esperimenti partorisca una fonte commerciale di energia.

Come diceva Yogi Berra, «è arduo fare previsioni, specialmente sul futuro», ma se potremo iniziare presto la progettazione e la costruzione del prossimo grande passo, oggi pensiamo davvero di poterlo raggiungere nei prossimi dieci anni.

GEROLD YONAS è vice presidente dei Sandia National Laboratories. La sua carriera ha avuto inizio nel 1962 al Jet Propulsion Laboratory di Pasadena. Yonas è ai Sandia dal 1972; e dal 1984 al 1986 ha dato supporto tecnico alla Strategic Defense Initiative Organization. È stato presidente della Titan Technologies di La Jolla dal 1986 al 1989, prima di fare ritorno ai Sandia. Ha all'attivo numerose pubblicazioni sui fasci di particelle di grande intensità, sulla fusione inerziale, sulle tecnologie di difesa strategica e sul trasferimento di tecnologie.

ANDERSON O. A., BAKER W. R., COLGATE S. A., ISE J. e PYLE R. V., *Neutron Production in Linear Deuterium Pinches* in «Physical Review», 110, n. 6, pp. 1375-1387, 1958.

PEREIRA N. R. e DAVIS J., *X-Rays from Z-Pinches on Relativistic Electron Beam Generators* in «Journal of Applied Physics», 64, n. 3, pp. R1-R27, 1988.

SMIRNOV V. P., *Fast Liners for Inertial Fusion* in «Plasma Physics and Controlled Fusion», 33, n. 13, novembre 1991.

RHODES RICHARD, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb*, Simon & Schuster, 1995.

KEITH M., *Z-Pinches as Intense X-Ray Sources for High-Energy Density Physics Applications* in «Physics of Plasmas», 4, n. 5, parte 2, maggio 1997.

Fare calcoli con il DNA

Il DNA può essere manipolato per risolvere problemi matematici, rivoluzionando le nostre idee sui computer

di Leonard M. Adleman

Le molecole di DNA - con le loro sequenze di adenina, timina, guanina e citosina (rappresentate con le lettere A, T, G e C) - si possono usare per memorizzare informazioni e per effettuare calcoli. Le molecola colorata qui disegnata, GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA, codifica la soluzione al semplice problema del percorso di Hamilton descritto nella finestra a pagina 70.

Computer. Una parola che evoca immagini di tastiere e monitor. Termini come ROM, RAM, gigabyte e megahertz affiorano alla mente. Intere generazioni sono già cresciute con l'idea che i processi di calcolo avvengano su componenti elettronici piazzati su un substrato di silicio.

Ma la cose stanno veramente così? Anche per leggere quest'articolo state usando un computer, anche se non somiglia molto a un PC. Forse, allora, abbiamo un'idea dei calcolatori troppo limitata. Perché non pensare a computer che siano ovunque e possano esistere in molte forme diverse? Possiamo per esempio immaginare un computer in forma liquida, in cui i processi di calcolo dipendano dall'interazione fra le molecole? La risposta è: sì. È l'inizio della storia dei computer a DNA.

La riscoperta della biologia

La mia parte in questa storia cominciò nel 1993, quando misi piede per la prima volta in un laboratorio di biologia molecolare. Anche se sono un matematico e un esperto di computer, all'epoca avevo già condotto alcune ricerche sull'AIDS, un campo che ritenevo, e ritengo tuttora, di estrema importanza. Sfortunatamente, tutti i tentativi di comunicare le mie idee agli scienziati che si occupavano di AIDS erano falliti. Così, per cercare di diventare più convincente in materia, decisi di acquisire una conoscenza più approfondita della biologia dell'HIV. Ecco perché entrai in un laboratorio di biologia molecolare dove, sotto la guida di Nickolas Chelyapov (che oggi è direttore di ricerca nel mio laboratorio), imparai le tecniche della moderna biologia.

Ero affascinato. Con le mie stesse mani potevo creare DNA che non esisteva in natura, e potevo introdurlo nei batteri, dove avrebbe funzionato da progetto per la costruzione di proteine che, a loro volta, avrebbero rivoluzionato la natura stessa di quegli organismi.

Durante questo periodo di intenso apprendistato, mi dedicai alla lettura di *The Molecular Biology of the Gene*, un testo classico di cui è co-autore James D. Watson, scopritore, con Francis Crick, della struttura a doppia elica del DNA. Le mie idee sulla biologia si stavano trasformando radicalmente. Questa non era più la scienza che si occupava di cose dall'odore strano stipate in un frigorifero, come credevo negli anni sessanta, quando ero studente all'Università della California a Berkeley. Il campo della biologia aveva subito una vera e propria rivoluzione e stava rapidamente acquistando la profondità e i mezzi che prima erano appannaggio delle scienze fisiche. La biologia ora permetteva di studiare l'informazione immagazzinata nel DNA - consistente in codici di quattro lettere: A, T, G e C, cioè le basi nucleotidiche adenina, timina, guanina e citosina - e l'elaborazione che l'informazione subiva all'interno della cellula. C'era della matematica in tutto questo!

Una sera, mentre ero steso a letto leggendo il libro di Watson, m'imbattei in una descrizione della DNA-polimerasi. Si tratta del re degli enzimi, il vero costruttore della vita. In condizioni appropriate, partendo da un'elica di DNA, la DNA-polimerasi produce una seconda elica complementare alla prima, in cui ogni C è rimpiazzata da una G, ogni G da una C, ogni A da una T e ogni T da una A. Per esempio, partendo da una molecola con la sequenza CATGTC, la DNA-polimerasi produrrà una nuova molecola con la sequenza GTACAG. La polimerasi permette al DNA di riprodursi, cosa che a sua volta permette alle cellule di riprodursi, e infine fa sì che noi stessi possiamo riprodurci. Per un riduzionista convinto, la replicazione del DNA compiuta dalla DNA-polimerasi contiene tutto il significato della vita.

La DNA-polimerasi è una minuscola e stupefacente nanomacchina, una singola molecola capace di «saltare» su un'elica di DNA e di scorrere lungo il filamento, di «leggere» ogni base che incontra e di «scrivere» la sua forma complementare in una nuova elica di DNA che sta crescendo. Mentre leggevo ammirato le proprietà di quest'incredibile enzima, rimasi colpito dalla sua somiglianza con ciò che Alan M. Turing, il celebre matematico inglese, aveva descritto nel 1936. Turing (e in modo indipendente anche Kurt Gödel, Alonzo Church e S. C. Kleene) avviò un rigoroso studio sul concetto di «computabilità», un lavoro puramente teorico - se pensiamo che i primissimi computer comparvero non meno di dieci anni dopo - che portò ad alcuni dei risultati matematici più brillanti di questo secolo. (Si veda l'articolo *La casualità in aritmetica* di G. J. Chaitin in «Le Scienze», n. 241, settembre 1988.)

Per i suoi studi, Turing inventò un computer «giocattolo», oggi famoso con il nome di macchina di Turing. Più che di un apparecchio reale, si trattava di una macchina virtuale, utile per gli studi matematici. A questo scopo bisognava ideare un dispositivo estremamente semplice, cosa che Turing risolse in modo particolarmente brillante. Una versione della macchina consisteva in una coppia di nastri e in un meccanismo di controllo «a stati finiti», che si muoveva leggendo i dati lungo il nastro di *input*, e allo stesso tempo scorreva sul nastro di *output* leggendo e scrivendo altri dati. Il meccanismo di controllo a stati finiti poteva essere programmato attraverso istruzioni molto semplici, e sarebbe stato facile scrivere un programma in grado di leggere una sequenza di A, T, C e G sul nastro di input e scrivere contemporaneamente sul nastro di output la sequenza complementare, secondo le regole di Watson e Crick. Difficilmente si potrebbe immaginare qualcosa di più simile alla DNA-polimerasi.

Ma un'altra cosa mi colpì particolarmente: la macchina di Turing è un computer universale; ossia, può essere programmata per calcolare tutto ciò che si presta al calcolo. (È questa, sostanzialmente, l'idea espressa nella famosa «tesi di Church».) In altri termini, si poteva programmare una macchina di Turing per farle produrre sequenze complementari di DNA, trovare i fattori di un numero, giocare a scacchi e così via. Quando pensai a questo, mi sedetti sul letto e, pensando al DNA, dissi a mia moglie Lori: «Diamine, quelle cose possono funzionare come un computer!». Rimasi sveglio tutta la notte, cercando di immaginare in che modo si potesse trasformare il DNA in un computer.

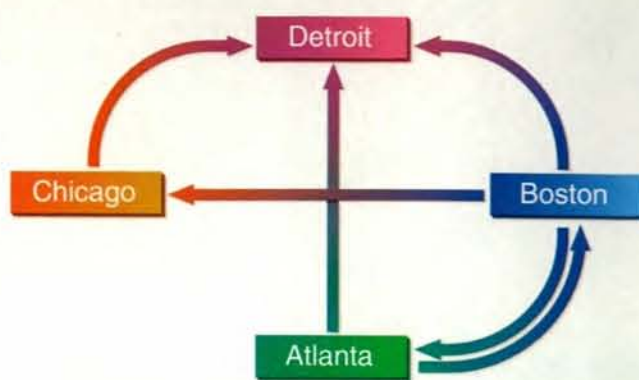
La mia prima idea fu quella di costruire un computer a DNA simile a una macchina di Turing, in cui il meccanismo di controllo a stati finiti fosse sostotuito con un enzima. In realtà, la stessa idea era stata suggerita almeno dieci anni prima da Charles H. Bennet e Rolf Landauer, che lavoravano all'IBM. (Si veda l'articolo *I limiti fondamentali del calcolo* di C. H. Bennet in «Le Scienze» n. 205, settembre 1985.) Sfortunatamente, mentre esisteva un enzima (la DNA-polimerasi) capace di leggere l'elica di partenza e di generare sequenze di DNA complementari, era difficile che esistessero altri enzimi in grado di effettuare compiti diversi, come per esempio scomporre un numero in fattori.

Quest'ultima constatazione è una bella lezione per noi biotecnologi: in realtà, siamo una comunità di ladri. Rubiamo molecole e idee alle cellule, ma siamo

Tomo Narashima

Il problema del percorso di Hamilton

Consideriamo una mappa in cui varie città siano collegate fra loro da voli diretti. Per esempio, nella mappa rappresentata in alto a destra, è possibile viaggiare direttamente da Boston a Detroit, ma non viceversa. Il problema è quello di determinare se esiste un percorso che inizi nella città di partenza (Atlanta), termini nella città di arrivo (Detroit) e passi soltanto una volta per tutte le altre città. Nel calcolo con il DNA, a ogni città viene assegnata una sequenza di DNA (ACTTGCAG nel caso di Atlanta), che possiamo pensare come composta da un nome (ACTT) seguito da un cognome (GCAG). I numeri di ciascun volo, codificati come DNA, si possono allora ottenere unendo il cognome della città di origine con il nome della città di destinazione (*in basso a destra*). Si possono poi ricavare le sequenze di DNA complementari ai codici dei nomi delle città, sostituendo in questi ultimi le C con G, le G con C, le A con T e le T con A (per semplicità, i dettagli delle estremità delle molecole di DNA - 3' o 5' - sono stati omessi). Nel caso particolare qui considerato, esiste un percorso hamiltoniano, passante, nell'ordine, per Atlanta, Boston e Chicago, con destinazione finale Detroit. Nel calcolo, questo percorso è rappresentato dalla sequenza GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA, lunga 24 nucleotidi. A sinistra è mostrata la mappa con sette città e 14 voli non-stop utilizzata nell'esperimento del testo.

L.M.A.

CITTÀ	NOME A DNA	COMPLEMENTO
ATLANTA	ACTTGCAG	TGAACGTC
BOSTON	TCGGACTG	AGCCTGAC
CHICAGO	GGCTATGT	CCGATACA
DETROIT	CCGAGCAA	GGCTCGTT

VOLO	NUMERO DI VOLO
ATLANTA - BOSTON	GCAGTCGG
ATLANTA - DETROIT	GCAGCCGA
BOSTON - CHICAGO	ACTGGGCT
BOSTON - DETROIT	ACTGCCGA
BOSTON - ATLANTA	ACTGACTT
CHICAGO - DETROIT	ATGTCCGA

Slim Films

ben lontani dal poter creare dal nulla macchine molecolari perfette come la DNA-polimerasi. Per fortuna, grazie a tre o quattro miliardi di anni di evoluzione, oggi esistono cellule che sono letteralmente piene di piccole macchine fantastiche. Sono queste macchine che, sottratte alle cellule, hanno reso possibile la nascita delle biotecnologie. Tuttavia, è lecito pensare che, durante l'evoluzione, non sia mai apparsa una macchina molecolare in grado di giocare a scacchi.

Perciò, se dovessi costruire un computer a DNA che fosse capace di fare qualcosa di interessante, dovrei farlo a partire dagli strumenti disponibili al giorno d'oggi. Questi sono essenzialmente gli strumenti a mia disposizione:

1. La complementarità fra le eliche del DNA. Come abbiamo visto, per ogni elica di DNA esiste una controparte complementare, secondo le regole di Watson e Crick. Se una molecola di DNA in soluzione incontra una sequenza di DNA complementare, le due eliche si appaiano – cioè si arrotolano fra loro per formare la famosa doppia elica. Le due eliche non sono unite da legami covalenti, ma piuttosto da forze più deboli, come i legami a idrogeno. Se invece una molecola di DNA in soluzione ne incontra una non complementare, o che non abbia almeno lunghe parti complementari, le due eliche non si appaiano.

2. Le polimerasi. Le polimerasi copiano l'informazione da una molecola a un'altra. Per esempio, la DNA-polimerasi fabbrica un'elica di DNA complementare partendo da un'«elica stampo» di DNA. In realtà, la DNA-polimerasi ha bisogno di una sorta di segnale di inizio che le indichi dove cominciare a fabbricare la copia complementare. Il segnale è costituito da un cosiddetto *primer*, o innesco, cioè un tratto di DNA, anche corto, che si appaia all'elica stampo grazie alla sua complementarità. Dovunque si sia formata una porzione di doppia elica fra il primer e lo stampo, la DNA-polimerasi comincerà ad allungare il primer aggiungendo basi e creando una copia complementare allo stampo.

3. Le ligasi. Le ligasi uniscono insieme due o più molecole. Per esempio, la DNA-ligasi riconosce due tratti di DNA che si trovano vicini e li unisce in modo covalente formando un unico filamento. Nelle cellule, la DNA-ligasi ha il compito di riparare le interruzioni che si creano nella molecola di DNA, come succede per esempio nelle cellule della pelle, dove il DNA subisce rotture accidentali causate dalla radiazione ultravioletta.

4. Le nucleasi. Le nucleasi tagliano le molecole di acidi nucleici. Per esempio, le cosiddette endonucleasi di restrizione «perlustrano» il DNA alla ricerca di specifiche sequenze di basi. Quando incontrano una di queste sequenze, tagliano la molecola in due pezzi. EcoRI (che prende il nome dal batterio *Escherichia coli*) è un enzima di restrizione che taglia il DNA immediatamente dopo la base G della sequenza GAATTC. La sua azione è altamente specifica, ed è rarissimo che tagli il DNA in sequenze diverse da questa. La teoria più accreditata è che le endonucleasi di restrizione si siano evolute per proteggere i batteri dai virus (sì, anche i batteri hanno i loro virus!). Per esempio, *E. coli* è in grado, attraverso un processo chiamato metilazione, di proteggere il proprio DNA dall'azione di EcoRI, mentre il DNA di un virus invasore che contenga la sequenza GAATTC verrà tagliato in due. Il computer a DNA che ho ideato non utilizzava enzimi di restrizione, che sono invece stati successivamente usati da molti altri gruppi ricerca.

5. L'elettroforesi su gel. Questo è uno dei pochi strumenti che non abbiamo rubato alle cellule. Una soluzione contenente molecole di DNA di diversa lunghezza viene posta in un pozzetto all'estremità di un sottile gel, e a questo viene applicata una corrente elettrica. Le molecole di DNA, che hanno carica negativa, sono attirate verso l'anodo, e le molecole più corte migrano più velocemente di quelle più lunghe. Perciò, questa tecnica permette di separare le molecole di DNA in base alla loro lunghezza. Utilizzando particolari reagenti e illuminando il gel con luce ultravioletta, è possibile vedere l'insieme delle molecole di DNA che hanno la stessa lunghezza, che appaiono come bande a diversa distanza dal pozzetto.

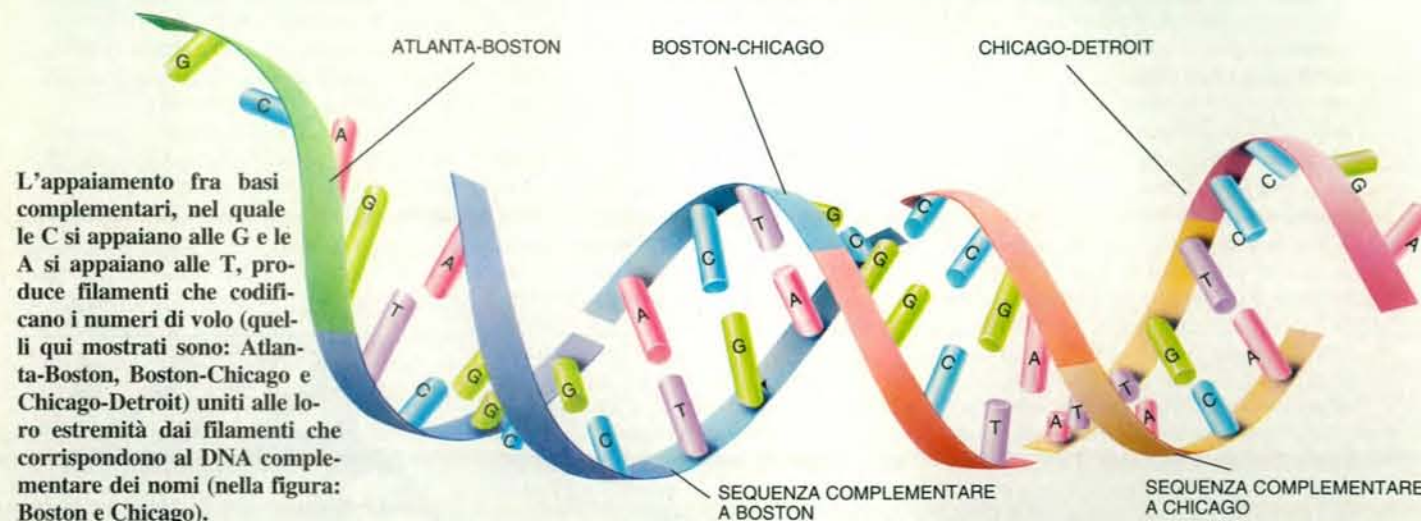
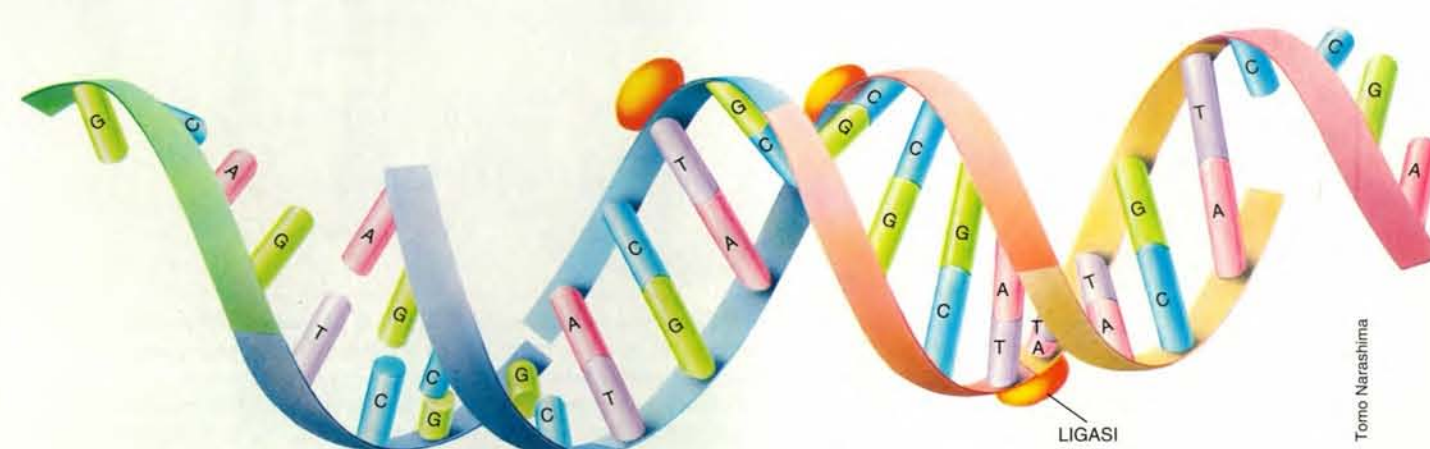
6. La sintesi artificiale di DNA. Oggi è possibile scrivere una sequenza di DNA su un foglio di carta, inviarla a una ditta specializzata e ricevere, in pochi giorni, una provetta contenente circa 10^{18} molecole di DNA, tutte (o quasi) contenenti la sequenza desiderata. In questo modo, oggi si possono maneggiare in modo efficiente sequenze lunghe fino a 100 nucleotidi. Per una sequenza di 20 nucleotidi, il costo è di circa 25 dollari. Le molecole vengono spedite liofilizzate e appaiono come una masserella bianca e amorfa sul fondo della provetta.

Verosimilmente, nessuno di questi strumenti può essere utile per giocare a scacchi, ma c'è un'altra cosa importante che i grandi logici degli anni trenta ci hanno insegnato: il calcolo automatico è una cosa semplice. Per costruire un computer, solo due cose sono veramente indispensabili: un metodo per immagazzinare le informazioni e poche semplici operazioni per elaborarle. La macchina di Turing memorizza le informazioni sotto forma di una sequenza di lettere su un nastro, e le manipola attraverso semplici istruzioni date al meccanismo di controllo a stati finiti.

In modo simile, un computer memorizza le informazioni sotto forma di sequenze di zero e uno e le elabora tramite le operazioni che il chip del processore è in grado di compiere. La cosa importante è che quasi ogni metodo con cui le informazioni vengono memorizzate - e quasi ogni insieme di operazioni usate per elaborarle - è in grado di dare una macchina universale, cioè capace di calcolare qualsiasi cosa possa essere calcolata. Per far sì che il vostro computer generi sequenze complementari a una sequenza di DNA, oppure giochi a scacchi, basta inserire le informazioni corrette e far eseguire al computer la giusta sequenza di operazioni: in altre parole far girare un programma. Il DNA è potenzialmente un ottimo supporto in cui immagazzinare le informazioni. In effetti, da milioni di anni le cellule usano questo sistema per immagazzinare i «progetti» della vita. Enzimi come le polimerasi e le ligasi elaborano poi queste informazioni. Questo bastava per costruire un computer universale? Forte delle lezioni apprese dagli scienziati degli anni trenta, ero sicuro che la risposta fosse: sì.

Il problema del percorso di Hamilton

La tappa successiva del mio lavoro era quella di scegliere un problema da risolvere. Idealmente, doveva trattarsi di un problema che non sembrasse conce-

ATLANTA-BOSTON
BOSTON-CHICAGO
CHICAGO-DETROIT
SEQUENZA COMPLEMENTARE A BOSTON
SEQUENZA COMPLEMENTARE A CHICAGO

L'appaiamento fra basi complementari, nel quale le C si appaiano alle G e le A si appaiano alle T, produce filamenti che codificano i numeri di volo (quelli qui mostrati sono: Atlanta-Boston, Boston-Chicago e Chicago-Detroit) uniti alle loro estremità dai filamenti che corrispondono al DNA complementare dei nomi (nella figura: Boston e Chicago).

Le ligasi hanno la funzione di legare fra loro le molecole che si sono concatenate. Quando queste proteine trovano due filamenti di DNA vicini fra loro, li uniscono in modo covalente per formare un'unica elica.

pito su misura per il mio sistema, e allo stesso tempo dimostrasse le potenzialità del nuovo metodo. Scelsi il problema del percorso di Hamilton.

William Rowan Hamilton era Reale astronomo d'Irlanda alla metà del XIX secolo. Il problema che porta il suo nome è illustrato nella finestra a pagina 70. Le frecce possono rappresentare voli senza scalo fra le città indicate nel grafico. Per esempio, si può volare senza scalo da Boston a Chicago, ma non viceversa. Il compito (il problema del percorso di Hamilton) è quello di determinare se esiste una sequenza di voli successivi (un percorso) che parta da Atlanta (il vertice di partenza) e termini a Detroit (il vertice di arrivo), e che passi, non più di una volta, per ognuna delle altre città (Boston e Chicago). Un percorso del genere è detto percorso hamiltoniano. Nell'esempio mostrato, è facile vedere che esiste un percorso hamiltoniano e che questo passa per le varie città in quest'ordine: Atlanta, Boston, Chicago, Detroit. Se la città di partenza fosse stata Detroit, e quella di arrivo Atlanta, è chiaro che non ci sarebbe stato alcun percorso hamiltoniano.

Più in generale, dato un grafico con frecce su cui siano definiti un vertice di partenza e uno di arrivo, si dice che esiste un percorso hamiltoniano solo se esiste un percorso che inizia dal vertice di partenza e termina al vertice di arrivo, passando una sola volta per tutti gli altri vertici. Il problema del percorso di Hamilton è quello di decidere se per un qualsiasi grafico assegnato, in cui siano specificati i vertici di partenza e di arrivo, esista tale percorso.

Sebbene il problema del percorso di Hamilton sia stato oggetto di numerosi studi da parte degli esperti di computer, non si è riusciti a elaborare un algoritmo efficiente (cioè rapido) in grado di risolverlo. In effetti, è probabile che, anche utilizzando i migliori algoritmi e i più potenti computer disponibili, per alcuni grafici, anche con meno di 100 vertici, ci vorrebbero centinaia di anni per determinare se esiste un percorso hamiltoniano.

All'inizio degli anni settanta si dimostrò che il problema del percorso di Hamilton era «NP-completo». Senza entrare nel dettaglio riguardo al significato di questa classificazione, è sufficiente dire che questa scoperta convinse la maggior parte dei teorici del computer che non sarebbe mai esistito alcun algoritmo in grado di risolvere il problema in modo efficiente. (Bisogna anche aggiungere che questo rimane un problema aperto della teoria della computazione, il cosiddetto problema NP = P?; si veda l'articolo *Macchine di Turing* di J. E. Hopcroft in «Le Scienze» n. 191, luglio 1984.)

Questo non significa che non esistano algoritmi in grado di risolvere il problema di Hamilton, ma semplicemente che non ne esiste alcuno che sia efficiente. Per esempio, consideriamo l'algoritmo che segue.

Sia dato un grafico con n vertici:

1. generare un gruppo di percorsi casuali attraverso il grafico;

2 . per ognuno dei percorsi:

a) verificare se il percorso inizia nel vertice di partenza e termina nel vertice di arrivo. Se questo non si verifica, scartare il percorso;

b) verificare se il percorso passa esattamente per n vertici. Se questo non si verifica, scartare il percorso;

c) per ogni vertice, verificare se il percorso passa attraverso il vertice. Se ciò non si verifica, scartare il percorso;.

3. se non tutti i percorsi sono stati scartati, riportare che esiste un percorso hamiltoniano. Se tutti i percorsi sono stati scartati, riportare che non esiste un percorso hamiltoniano.

Questo non è un algoritmo perfetto; tuttavia, se i percorsi vengono generati in modo casuale e in quantità sufficiente, ci sono buone probabilità di ottenere una risposta corretta. È questo l'algoritmo che ho utilizzato nel mio primo calcolo effettuato con il DNA.

Sette giorni in laboratorio

Per il mio esperimento, cercavo un problema del percorso di Hamilton abbastanza semplice da poter essere risolto rapidamente in laboratorio, e allo stesso tempo abbastanza complesso da fornire una prova inoppugnabile delle potenzialità dei computer a DNA. Scelsi quindi il grafico formato da sette città e 14 percorsi di volo mostrato nella finestra a pagina 70. Uno studio empirico ha mostrato che ci vogliono in media circa 54 secondi per trovare l'unico percorso hamiltoniano di questo grafico (potete provare adesso...).

Per semplicità, consideriamo il grafico che contiene solo quattro città - Atlanta, Boston, Chicago e Detroit – collegate fra loro da sei voli. Il problema è quello di stabilire se esiste un percorso hamiltoniano che inizia ad Atlanta e termina a Detroit.

Cominciai il lavoro assegnando a ogni città una sequenza casuale di DNA. Nel nostro esempio, Atlanta diventa ACTTGCAG, Boston TCGGACTG e così via. Può essere utile considerare la prima e la seconda metà della sequenza rispettivamente come il nome e il cognome della città. Così, il cognome di Atlanta è GCAG, mentre il nome di Boston è TCGG. Poi assegnai a ogni volo diretto un «numero di volo» a DNA, ottenuto unendo il cognome della città di partenza con il nome della città di arrivo. Nel nostro esempio, il volo Atlanta-Boston ha il numero GCAGTCGG.

Non bisogna dimenticare che per ogni elica di DNA esiste un'elica complementare. Allo stesso modo, ogni nome di città codificato come sequenza di DNA ha il suo corrispettivo nome complementare. Quello di Atlanta, per esempio, è TGAACGTC.

Una volta codificati questi nomi, feci sintetizzare i DNA complementari ai nomi delle città e i DNA corrispondenti ai numeri dei voli (come fu chiaro in seguito, i nomi delle città erano più lunghi del necessario). Prelevai un pizzico (circa 10^{14} molecole) di ognuno dei DNA e li trasferii insieme in una provetta di reazione. Per iniziare il calcolo, aggiunsi semplicemente dell'acqua, più l'enzima ligasi, sali e qualche altro ingrediente in modo da simulare le condizioni esistenti all'interno delle cellule. In tutto, il volume della reazione non superava la cinquantesima parte di un cucchiaino da tè. Dopo circa un secondo, tenevo in mano la risposta al problema del percorso di Hamilton.

Per capire come, pensiamo a quanto era successo all'interno del tubo di reazione. Per esempio, i DNA che codificano il numero del volo Atlanta-Boston (GCAGTCGG), e il nome complementare di Boston (AGCCTGAC) si possono incontrare per caso. Inoltre, le sequenze sono state progettate in modo che la prima termini con TCGG, e la seconda inizi con AGCC. Dato che queste estremità sono complementari, si appaieranno fra loro. Se la molecola risultante incontrerà poi il numero del volo Boston-Chicago (ACTGGGCT), anche quest'ultimo si unirà al complesso, perché il suo inizio (ACTG) è complementare alla «coda» del complesso (TGAC). In questo modo, si formano catene sempre più lunghe, in cui i DNA che codificano i numeri di volo sono tenuti insieme dai DNA complementari ai nomi delle rispettive città.

La ligasi presente nella reazione lega poi in modo permanente le catene di DNA che si sono unite a formare i complessi. Così, il tubo di reazione conterrà molecole di DNA che codificano percorsi casuali attraverso le diverse città, così come prevede la prima tappa dell'algoritmo.

Dato che avevo cominciato con un numero enorme di molecole di DNA e che il problema riguardava solo poche città, si poteva essere praticamente certi che almeno una delle molecole formate avrebbe codificato il percorso hamiltoniano. Era incredibile pensare che la soluzione di un problema matematico potesse essere contenuta in una singola molecola!

È anche da notare che tutti i percorsi erano nati quasi contemporaneamente dall'interazione simultanea di migliaia di miliardi di molecole. Una reazione biochimica di questo genere rappresenta uno straordinario esempio di calcolo parallelo.

Dal grafico della finestra, si vede che esiste un solo percorso hamiltoniano, quello che attraversa, nell'ordine, Atlanta, Boston, Chicago e Detroit. Perciò la sequenza di DNA che codifica la soluzione del problema sarà: GCAGTCG-GACTGGGCTATGTCCGA.

Sfortunatamente, anche se avevo in mano la soluzione, assieme a questa c'erano almeno 100 000 miliardi di molecole che codificavano percorsi non hamiltoniani e dovevano essere eliminate.

Per scartare le molecole che non iniziavano con la città di partenza e non terminavano con la città di arrivo, mi basai sulla reazione a catena della polimerasi (PCR). Questa importante tecnica richiede l'uso di molte copie di due primer, brevi tratti di DNA che segnali-

Tomo Narashima

La reazione a catena della polimerasi (PCR) si può utilizzare per replicare le molecole di DNA che iniziano con la città di partenza (Atlanta) e terminano con la città di arrivo (Detroit). Nell'esempio, un primer - GGCT, che rappresenta la sequenza complementare del nome di Detroit - viene fatto appaiare all'estremità destra del filamento di DNA. Il primer stimola la polimerasi a iniziare la sintesi di un'elica complementare al filamento. Compiuta la sintesi, la doppia elica viene scissa in due filamenti, così che la polimerasi possa nuovamente sintetizzare il complementare di ciascuna elica. Il processo viene ripetuto più volte fino a ottenere un gran numero di copie di molecole che contengono le città di partenza e di arrivo corrette. Tramite elettroforesi su gel si possono poi isolare le molecole che possiedono la lunghezza giusta, in questo caso 24.

Le molecole sonda possono servire a isolare i filamenti di DNA che codificano i percorsi passanti per tutte le città intermedie (Boston e Chicago). Le sonde contenenti il DNA complementare all'intero nome di Boston (AGCCTGAC) vengono legate a microsfere di ferro sospese in un liquido. Per la complementarità fra le basi, le sonde catturano i filamenti di DNA che contengono il nome di Boston (TCGGACTG). I filamenti che non contengono il nome di Boston vengono quindi eliminati. Il processo viene ripetuto utilizzando sonde che codificano il complementare del nome di Chicago. Una volta completate tutte le tappe di calcolo, rimarranno solo i filamenti che codificano la soluzione GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA.

no alla polimerasi dove iniziare la replicazione dello stampo. Come inneschi, utilizzai la sequenza corrispondente al cognome della città di partenza (GCAG per Atlanta) e la sequenza complementare al nome della città di arrivo (GGCT per Detroit). Questi due primer operavano in modo combinato. Il primo obbligava la polimerasi a fabbricare la copia complementare delle molecole che iniziavano con la giusta città di partenza; il secondo dava inizio alla duplicazione delle molecole che terminavano con la giusta città di arrivo.

La PCR funziona attraverso cicli termici, in cui la temperatura della miscela contenuta nella provetta di reazione viene fatta salire e scendere. Temperature relativamente alte stimolano la DNA-polimerasi a iniziare la duplicazione; temperature maggiori provocano la scissione delle doppie eliche appena formate, permettendo così la successiva replicazione dei singoli filamenti. Come risultato, le molecole che possedevano le corrette città di partenza e di arrivo venivano duplicate a velocità esponenziale. Al contrario, le molecole che contenevano solo la giusta città di partenza, o di arrivo, venivano duplicate in modo lineare, molto più lento del precedente. Infine, le sequenze di DNA che non possedevano né la giusta città di partenza né quella di arrivo non venivano duplicate affatto. Così, una volta effettuata la PCR, la miscela di reazione conteneva moltissime copie delle molecole con la giusta città di partenza e di arrivo, e pochissime copie - se non nessuna - delle molecole che non soddisfacevano questo requisito. Quindi, il passo 2*a* dell'algoritmo era stato completato.

Dopo questa tappa, utilizzai l'elettroforesi su gel per identificare le molecole che possedevano la giusta lunghezza (24 nucleotidi, nell'esempio dell'inserto). Tutte le altre molecole vennero scartate. Questo costituiva la tappa 2*b* dell'algoritmo.

Verificai poi se i percorsi codificati dalle molecole rimaste passassero attraverso tutte le città della lista. Per far ciò mi servii di una procedura chiamata separazione per affinità, che sfrutta il principio della complementarità fra le basi nucleotidiche. In questo processo utilizzai molte copie di un DNA «sonda», che codificava il nome complementare a quello di una città (per esempio Boston). Queste sonde di DNA erano attaccate a microscopiche sferette di ferro, del diametro di circa un micrometro.

Aggiunsi le microsfere alla miscela contenente le molecole restanti, in condizioni che favorivano l'appaiamento fra le sequenze complementari. Solo le molecole contenenti il nome della città desiderata (Boston, nell'esempio) si sarebbero legate alla sonda. Infine, avvicinai un magnete, così da attrarre e tenere attaccate alle pareti della provetta le microsfere metalliche mentre eliminavo la fase liquida con le molecole che non contenevano il nome della città desiderata. Aggiunsi poi nuovo solvente e allontanai il magnete, in modo da risospendere le microsfere. Aumentando la temperatura, feci staccare le molecole di DNA dalle sonde per dissolverle nel liquido. Infine, riavvicinai il magnete, in modo da attrarre nuovamente le microsfere, che questa volta non avevano alcuna molecola attaccata. Il liquido, che ora conteneva le eliche di DNA desiderate (nel nostro esempio, quelle che codificano tutti i percorsi che passano per Boston), poteva essere trasferito in una nuova provetta per le analisi successive. Ripetei il processo per tutte le altre città intermedie (Chicago, nell'esempio). Questo procedimento ripetitivo, che richiese un intero giorno di lavoro in laboratorio, costituì la parte più noiosa dell'esperimento.

Alla fine della separazione per affinità la tappa 2*c* dell'algoritmo era conclusa ed ero certo che nel tubo rimanevano solo le molecole di DNA che codificavano per percorsi hamiltoniani. Perciò, la presenza di DNA nel tubo avrebbe indicato l'esistenza di un percorso hamiltoniano. Se, invece, nella provetta non ci fosse stato DNA, ciò avrebbe significato che non esisteva alcun percorso hamiltoniano. Fortunatamente, potevo eseguire la verifica con una semplice reazione di PCR, seguita da un'elettroforesi su gel. Con mia grande soddisfazione, l'analisi finale rivelò che le molecole rimaste codificavano effettivamente il percorso hamiltoniano atteso. Dopo sette giorni passati in laboratorio, il primo calcolo effettuato per mezzo del DNA era terminato.

Una nuova scienza

Quale sarà il futuro di queste tecniche? È chiaro che i computer a DNA offrono molti interessanti vantaggi. Primo fra tutti, quello di poter memorizzare le informazioni con un'altissima densità. Per esempio, un solo grammo di DNA, che secco occuperebbe un volume di circa un centimetro cubo, può immagazzinare le informazioni contenute in circa mille miliardi di CD. Inoltre, i computer a DNA offrono un'enorme capacità di calcolo parallelo.

Perfino nell'esperimento che ho condotto in un volume pari alla cinquantesima parte di un cucchiaino, il sistema ha permesso di concatenare circa 10^{14} numeri di volo in circa un secondo. Non è detto che il più veloce dei supercomputer esistenti oggi sia capace di compiere un'operazione del genere altrettanto velocemente. Potenzialmente, i computer molecolari hanno anche un'efficienza energetica straordinaria. In linea di massima, un joule è sufficiente per compiere circa 2×10^{19} reazioni di ligasi. Una cosa tanto più notevole se pensiamo che la seconda legge della termodinamica prevede che si possano compiere al massimo 34×10^{19} operazioni irreversibili per joule, a temperatura ambiente. I supercomputer esistenti oggi, che effettuano al massimo 10^9 operazioni per joule, sono di gran lunga meno efficienti.

Tecnici e teorici di tutto il mondo stanno cercando di sfruttare queste proprietà. Riusciranno a creare computer molecolari in grado di competere con quelli elettronici? Staremo a vedere. Enormi investimenti intellettuali e finanziari in più di mezzo secolo hanno fatto dei computer elettronici la meraviglia della nostra era, un primato difficile da battere.

Ma sarebbe sbagliato vedere questo tipo di ricerche solo dal punto di vista applicativo. Il risultato del mio esperimento si può considerare la manifestazione di un'area emergente della scienza, resa possibile dalla nostra capacità sempre maggiore di controllare il mondo molecolare. Tracce di questa nuova «scienza molecolare» si possono trovare in molti campi. Per esempio, Gerald F. Joyce dello Scripps Research Institute di La Jolla, in California, «alleva» migliaia di miliardi di molecole di RNA, una generazione dopo l'altra, cercando di fare evolvere molecole «campionesse» che possiedano le proprietà catalitiche desiderate (si veda l'articolo *Evoluzione molecolare guidata* di G. F. Joyce in «Le Scienze» n. 294, febbraio 1993). Julius Rebek, Jr., del Massachusetts Institute of Technology crea molecole in grado di riprodurre se stesse, ricavando informazioni sulla comparsa della vita sulla Terra (si veda l'articolo *Molecole sintetiche autoreplicanti* di J. Rebek, Jr., in «Le Scienze» n. 313, settembre 1994). Ispirato dalle ricerche sui computer a DNA, Erik Winfree del California Institute of Technology sintetizza complessi molecolari «intelligenti» che possono essere «programmati» per autoassemblarsi in strutture predeterminate più o meno complesse. Questi sono solo alcuni degli esempi, che mostrano le potenzialità di questa nuova disciplina che dovremo sviluppare e nutrire.

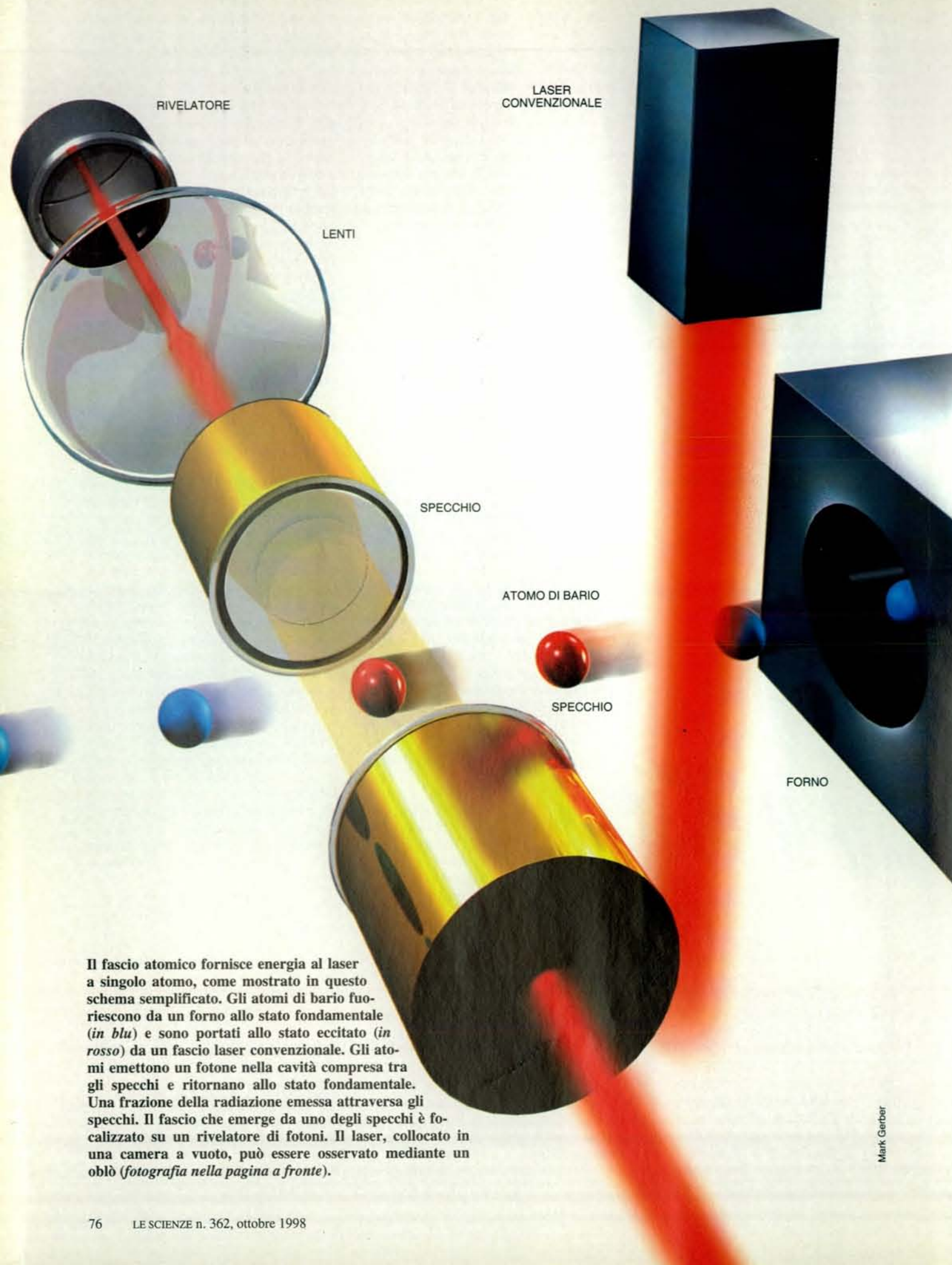
Personalmente, mi basta sapere che è possibile eseguire calcoli con il DNA. Negli ultimi cinquant'anni l'informatica e la biologia hanno conosciuto uno sviluppo fiorente, e non c'è alcun dubbio che queste scienze avranno un ruolo centrale nei progressi economici e scientifici del nuovo millennio. Ma biologia e informatica, vita e computer sono legati fra loro. Sono sicuro che per chi vorrà esplorarli, l'incontro fra questi due campi del sapere riserverà grandi sorprese.

LEONARD M. ADLEMAN ha conseguito il dottorato in informatica nel 1976 all'Università della California a Berkeley. Nel 1977 è entrato al Dipartimento di matematica del Massachusetts Institute of Technology, dove si è specializzato nella teoria degli algoritmi numerici ed è stato uno degli inventori del sistema di crittografia a chiave pubblica RSA (la «A» di RSA sta per «Adleman»). Subito dopo essere entrato alla Facoltà di informatica alla University of Southern California, è stato «coinvolto» nella comparsa dei virus informatici. È membro della National Academy of Engineering.

ADLEMAN LEONARD M., *Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems* in «Science», 266, 11 novembre 1994.

GIFFORD DAVID K, *On the Path to Computation with DNA* in «Science», 266, 11 novembre 1994.

LIPTON RICHARD J., *DNA Solution of Hard Computational Problems* in «Science», 268, 28 aprile 1995.

Per altre informazioni sui computer a DNA si può consultare il sito Internet: **http://users.aol.com/ibrandt/dna_computer.html**

Il fascio atomico fornisce energia al laser a singolo atomo, come mostrato in questo schema semplificato. Gli atomi di bario fuoriescono da un forno allo stato fondamentale (*in blu*) e sono portati allo stato eccitato (*in rosso*) da un fascio laser convenzionale. Gli atomi emettono un fotone nella cavità compresa tra gli specchi e ritornano allo stato fondamentale. Una frazione della radiazione emessa attraversa gli specchi. Il fascio che emerge da uno degli specchi è focalizzato su un rivelatore di fotoni. Il laser, collocato in una camera a vuoto, può essere osservato mediante un oblò (*fotografia nella pagina a fronte*).

Mark Gerber

Il laser a singolo atomo

Un nuovo tipo di laser, che sfrutta l'energia di singoli atomi, rivela come la luce interagisce con la materia

di Michael S. Feld e Kyungwon An

Dalla sua invenzione, avvenuta quasi 40 anni fa, il laser è diventato un dispositivo diffuso quasi ovunque. Insegnanti e guide turistiche usano il suo sottile fascio come puntatore. Alle casse dei supermercati il laser legge i codici a barre sulle merci e gli amanti della musica possono ascoltare registrazioni di alta qualità grazie ai laser in miniatura contenuti nei lettori di compact disc. Tutti questi diversi tipi di laser si basano sullo stesso principio: un enorme numero di atomi o molecole - da milioni a migliaia di miliardi - operano insieme per produrre un intenso fascio di radiazione monocromatica. Di recente, invece, siamo riusciti a realizzare un laser che funziona con il minimo numero di atomi possibile: uno solo.

Un laser a singolo atomo non può leggere codici a barre o compact disc; la sua potenza è di circa un milionesimo di milionesimo di watt (i laser nei lettori CD sono milioni di volte più potenti). Questo dispositivo, tuttavia, ha già dimostrato di essere un importante strumento sperimentale. La luce generata da un laser a singolo atomo manifesta proprietà che possono essere spiegate soltanto dalla meccanica quantistica, la teoria che governa le interazioni su scala atomica e subatomica. Analizzando le prestazioni del laser in diverse condizioni, si possono sperimentare le previsioni della teoria quantistica e trarre nuove conoscenze sulla natura della luce laser.

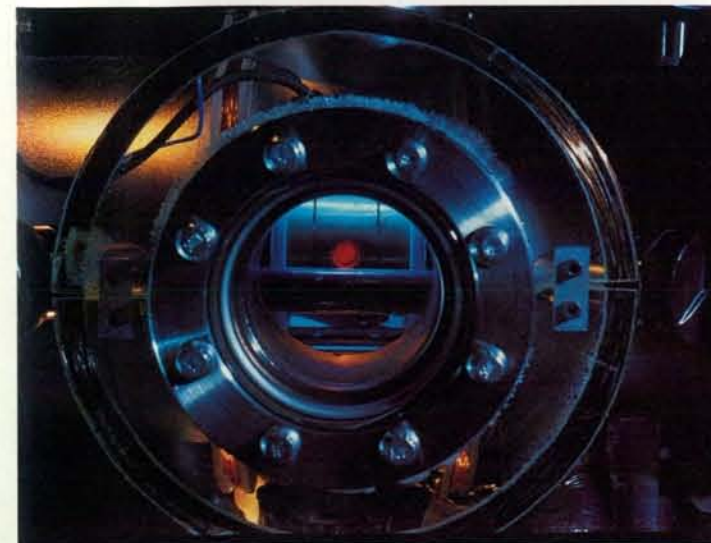
Il laser convenzionale

Per apprezzare il laser a singolo atomo, si deve prima capire come funzionano i laser ordinari. Ogni laser contiene due elementi essenziali: un risonatore ottico, normalmente costituito da due specchi allineati che riflettono la luce avanti e indietro, e un mezzo laser, posizionato tra gli specchi, che genera e amplifica la luce. In un laser a elio-neon, per esempio, il mezzo attivo è costituito da una miscela dei due gas; in un laser a neodimio-YAG, il mezzo consiste in ioni di neodimio inseriti in un composto cristallino di ittrio e alluminio. Gli atomi e le molecole nel mezzo non sono omogenei; essi sono distribuiti su molti stati quantici distinti, o livelli di energia. Solo uno degli elementi o dei composti del mezzo partecipa al processo, e solo una piccola frazione degli atomi emette effettivamente radiazione laser: questi si dicono talora «atomi attivi», mentre i rimanenti sono detti «atomi di fondo». Gli atomi attivi si alternano tra due degli stati energetici. L'amplificazione della radiazione generata può avvenire solo quando il numero degli atomi attivi nello stato a energia più alta, o stato eccitato, supera quello degli atomi nello stato a energia più bassa. Questa condizione è detta di inversione di popolazione.

Per portare gli atomi attivi dallo stato di energia più bassa a quello eccitato, il laser deve essere alimentato da una sorgente di energia, per esempio una corrente elettrica. Ma gli atomi eccitati non rimangono eccitati indefinitamente: la loro tendenza naturale è di ritornare allo stato di energia più basso. Quando ciò accade, essi emettono radiazione in direzioni casuali, secondo un processo chiamato «emissione spontanea». Una piccola frazione dei fotoni prodotti dalla diseccitazione spontanea si dirige verso uno degli specchi ed è riflessa indietro nel mezzo attivo. La luce riflessa induce gli atomi eccitati a emettere altri fotoni con la stessa lunghezza d'onda, direzione e fase. Questa produzione di radiazione con le stesse caratteristiche della luce originale, detta «emissione stimolata», è responsabile delle straordinarie proprietà della radiazione laser. Rimbalzando avanti e indietro tra gli specchi, la luce è continuamente amplificata dal mezzo. Una piccola frazione di questa luce è trasmessa attraverso uno degli specchi, che è progettato per essere leggermente meno riflettente rispetto all'altro, consentendo così al ben noto fascio laser di fuoriuscire.

Affinché si verifichi l'oscillazione laser, il guadagno - cioè l'aumento dell'intensità della luce quando passa attraverso il mezzo laser - deve superare la perdita di intensità del fascio dovuta alle imperfezioni degli specchi e ad altri fattori. Le condizioni in cui si verifica questo requisito sone note come «soglia» del laser. I laser convenzionali devono avere un mezzo contenente un enorme numero di atomi o molecole per fornire un guadagno sufficiente a superare le perdite. Un laser a elio-neon che genera una potenza di un milliwatt contiene alcuni milioni di miliardi di atomi di neon e circa 10 volte tanti atomi di elio. L'amplificazione della luce raggiunge l'equilibrio quando circa un miliardo di fotoni viene riflesso tra gli specchi del risonatore. Sono cioè necessari milioni di atomi di neon e decine di milioni di atomi di elio per mantenere ogni fotone nel risonatore.

Sam Ogden

Ci sono vari modi per ridurre il numero di atomi necessario. Si può ridurre la perdita di intensità del fascio migliorando la

	A ELIO-NEON	A NEODIMIO-YAG	A SEMICONDUTTORE IN MICROCAVITÀ	A SINGOLO ATOMO
DISTANZA TRA GLI SPECCHI	DA 20 A 100 CENTIMETRI	DA 5 A 15 CENTIMETRI	DA 2 A 5 MICROMETRI	1 MILLIMETRO
NUMERO DI ATOMI	10^{16} ATOMI DI NEON	10^{19} IONI DI NEODIMIO	10^{6} COPPIE ELETTRONE--LACUNA	1 ATOMO DI BARIO
POTENZA (WATT)	0,001	1,0	0,0001	0,000000000001

Mark Gerber

I quattro laser mostrano caratteristiche molto diverse, sebbene tutti producano fasci di radiazione monocromatica. Il laser a elio-neon può essere trovato in ogni lettore di codici a barre dei supermercati, mentre il più potente laser a neodimio-YAG è usato in chirurgia. Il laser a semiconduttore in microcavità, ancora in fase di sviluppo, potrà un giorno essere usato nei computer ottici. Il laser a singolo atomo è principalmente uno strumento sperimentale, ma potrebbe trovare applicazioni nell'elaborazione di informazioni a basso rumore e in spettroscopia di precisione.

riflettività degli specchi; i fotoni vengono così mantenuti più a lungo nel risonatore e possono accumularsi più facilmente. In alcuni casi è possibile aumentare il guadagno del laser riducendo il numero degli atomi di fondo, che interferiscono con l'amplificazione della luce a causa delle collisioni con gli atomi attivi. In pratica, però, anche i più efficienti laser convenzionali richiedono almeno 100 000 atomi per ogni fotone che resta nel risonatore. Chiaramente, un laser convenzionale non può generare un fascio usando un solo atomo.

Atomi in cavità

Il nostro laser a singolo atomo sfrutta un metodo alternativo di amplificazione della luce, basato su un processo detto oscillazione quantizzata di Rabi. Il fenomeno è stato studiato da scienziati impegnati nel campo dell'elettrodinamica quantistica delle cavità, che indaga il comportamento degli atomi in risonatori molto piccoli (si veda l'articolo *L'elettrodinamica quantistica delle cavità* di S. Haroche e J.-M. Raimond in «Le Scienze» n. 298, giugno 1993), e rappresenta probabilmente la forma più elementare di interazione tra luce e materia.

L'oscillazione di Rabi consiste nello scambio periodico di energia tra gli atomi e un campo elettromagnetico. Fu il fisico Isidor I. Rabi a studiare per primo questo fenomeno, negli anni trenta. Quando Rabi espose un campione di atomi a onde radio accordate in modo particolare, trovò che gli atomi dello stato fondamentale passavano allo stato eccitato poiché assorbivano energia dal campo. Questo assorbimento avveniva perché l'energia dei fotoni a radiofrequenza uguagliava la differenza di energia tra lo stato fondamentale e lo stato eccitato. Una volta che tutti gli atomi avevano raggiunto lo stato eccitato, tuttavia, non erano in grado di assorbire altra energia. Così il processo si invertiva: con un irraggiamento continuo gli atomi iniziavano a riemettere la loro energia nel campo applicato ritornando nello stato fondamentale. Poi cominciavano ad assorbire nuovamente energia, ripetendo il ciclo.

Negli esperimenti di Rabi le azioni dei singoli atomi e fotoni non erano osservabili. Siccome i fotoni a radiofrequenza hanno un'energia molto piccola, anche un'onda radio di bassa potenza ne contiene un numero enorme. Così, tra gli atomi e i fotoni avvengono tanti scambi di energia che i loro effetti sono mediati e non lasciano nessuna possibilità di studiare la natura quantistica dello scambio. Nei primi anni sessanta, però, Edwin T. Jaynes della Washington University e Frederick W. Cummings dei laboratori di ricerca della Ford Motor Company svilupparono una teoria per spiegare come un singolo atomo con due livelli di energia potrebbe interagire con un'onda che contenga solo un piccolo numero di fotoni. Con un solo atomo, le frequenze delle oscillazioni di Rabi non possono essere arbitrarie: esse devono assumere valori quantizzati, proprio come i livelli distinti di energia degli atomi. In altri termini, un atomo a due livelli emetterà e assorbirà fotoni a ritmi diversi, determinati dall'intensità del campo elettromagnetico circostante.

Una significativa conseguenza di questa teoria è che un atomo eccitato può essere indotto a emettere un fotone semplicemente quando si trovi in una cavità molto piccola. Se la cavità è risonante – cioè se le sue pareti sono riflettenti e le sue dimensioni sono calibrate in modo che i fotoni emessi dall'atomo possano rimanere intrappolati all'interno – si crea un accoppiamento quantomeccanico che induce l'atomo a emettere un fotone molto più velocemente di quanto non accadrebbe nel vuoto. Se l'atomo rimane nella cavità, riassorbirà il fotone che ha emesso ripetendo il ciclo. Questo processo è detto «oscillazione di Rabi nel vuoto», in quanto inizialmente non c'è alcun campo elettromagnetico nella cavità. Se all'interno della cavità sono presenti uno o più fotoni prima che sia introdotto l'atomo eccitato, questo sarà sottoposto all'oscillazione quantizzata di Rabi ed emetterà e assorbirà fotoni a una velocità ancora più elevata.

Il fenomeno è stato dimostrato in laboratorio nel 1984, quando Herbert Walther del Max-Planck-Institut für Quantenoptik di Garching, in Germania, sviluppò il micromaser, un dispositivo a microonde basato sulla teoria quantistica. Nell'esperimento di Walther, un fascio di atomi di Rydberg - atomi in cui gli elettroni più esterni sono eccitati su ampie orbite circolari - fluiva, un atomo alla volta, attraverso una piccola cavità metallica con pareti altamente riflettenti. La cavità era analoga a un risonatore laser, in quanto le sue dimensioni erano regolate sulla lunghezza d'onda dei fotoni a microonde emessi dagli atomi di Rydberg quando tornavano allo stato di energia più bassa. Passando nella cavità gli atomi emettevano fotoni a velocità crescente, come previsto da Jaynes e Cummings. I fotoni si accumulavano nel risonatore perché le sue pareti erano superconduttrici e potevano essere raffreddate appena sopra lo zero assoluto per renderne massima la riflettività.

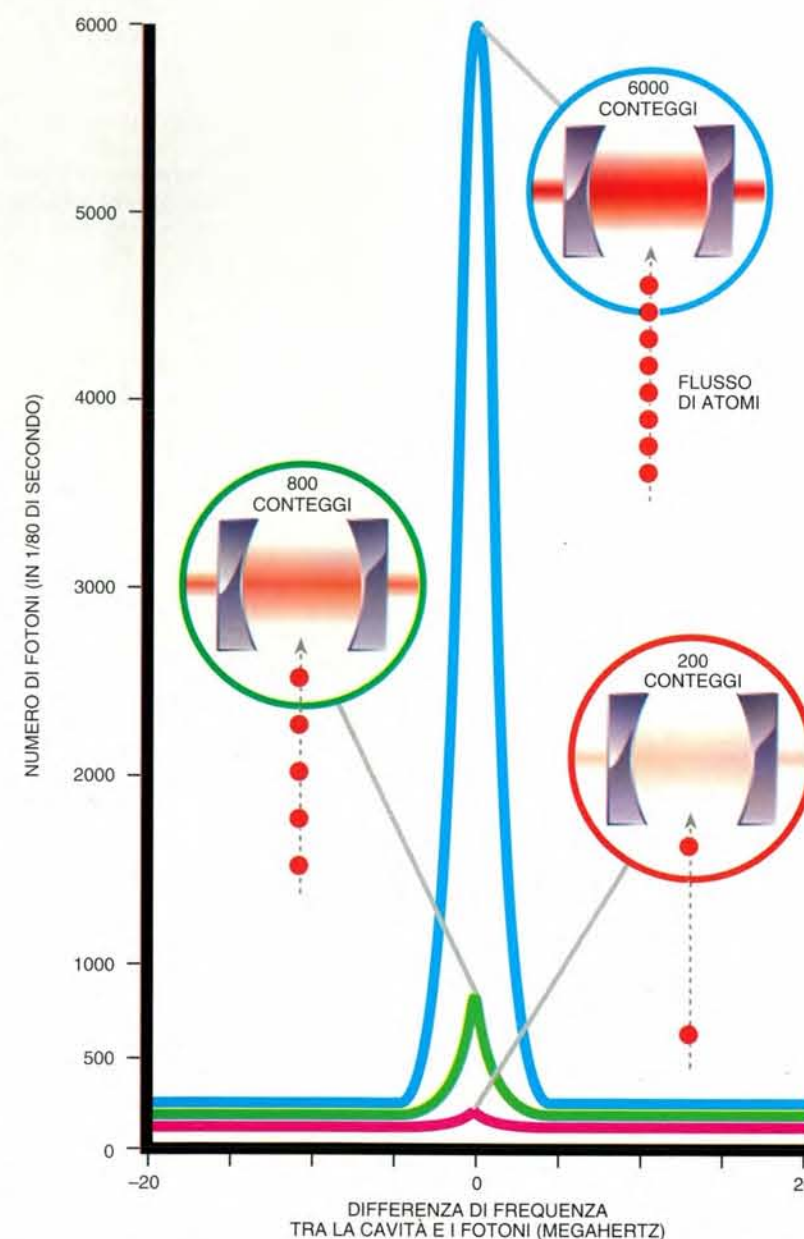
Il laser a singolo atomo è una versione ottica del micromaser. Atomi eccitati su due livelli fluiscono l'uno dopo l'altro attraverso un piccolo risonatore ed emettono fotoni infrarossi che sono appena sotto l'intervallo visibile. Il primo fotone è emesso all'interno della cavità vuota a causa dell'oscillazione di Rabi nel vuoto; quindi si verifica un'ulteriore amplificazione della luce attraverso il processo di oscillazione quantizzata di Rabi. All'aumentare del numero di fotoni nella cavità, aumenta la probabilità che un atomo, che passa attraverso il risonatore, emetta un altro fotone. Questo aumento è il processo fondamentale dal quale dipende il fenomeno di emissione stimolata in un laser convenzionale.

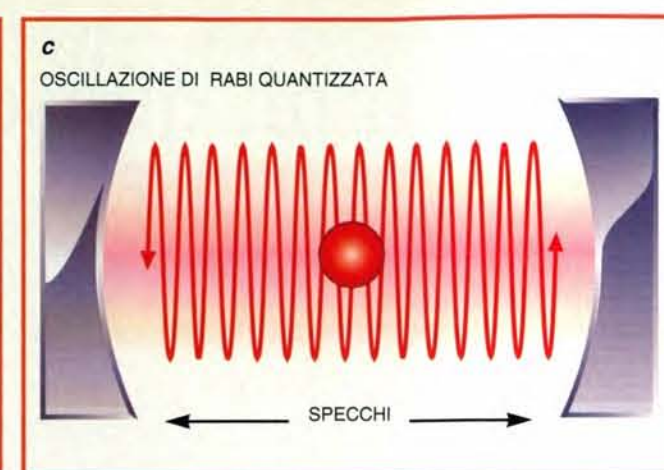
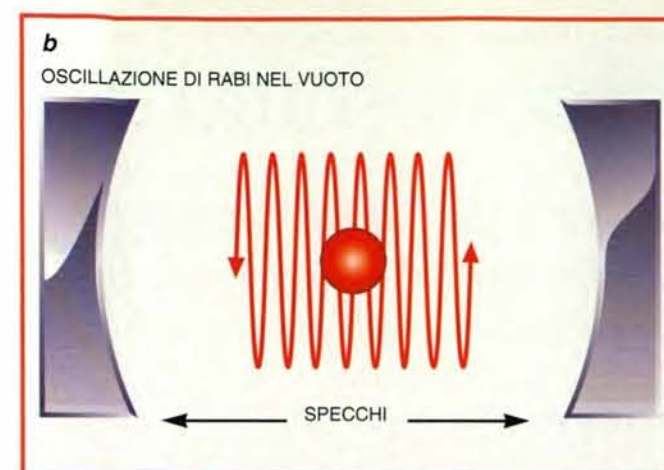
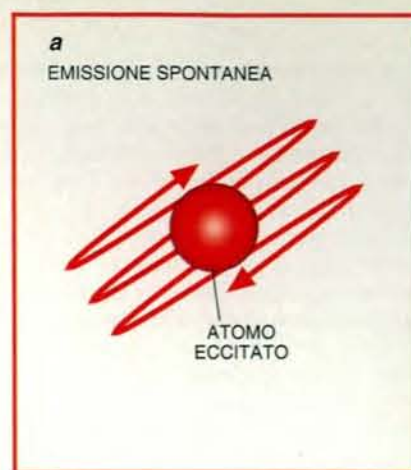
La costruzione di un laser a singolo atomo funzionante dipendeva dalla progettazione di un risonatore ottico che potesse conservare un fotone per un tempo relativamente lungo prima che esso venisse assorbito da uno degli specchi o trasmesso fuori dalla cavità. Abbiamo usato un nuovo tipo di risonatore detto a supercavità, che consiste in due specchi di riflettività estremamente elevata allineati con alta precisione. Negli anni sessanta un gruppo di ricerca della NASA, che stava provando a sviluppare un sistema di propulsione basato su ioni ad alta velocità, scoprì che i fasci di ioni rivestivano le pareti di una cavità vuota di un sottile film di ioni altamente riflettente. Negli anni settanta e ottanta furono utilizzati fasci di ioni per rivestire gli specchi di giroscopi laser. Nonostante questa tecnologia permettesse di ottenere una riflettività mai superata, piccole imperfezioni nella struttura dello specchio ne limitavano le prestazioni in un risonatore.

Se, però, gli sperimentatori avessero usato solo una piccola parte dello specchio - tipicamente dell'ordine di un millimetro - le imperfezioni sarebbero diventate trascurabili. Gli specchi potevano allora operare in modo ottimale in un risonatore, fornendo una riflettività fino al 99,9999 per cento. (Gli specchi in un laser convenzionale sono riflettenti al 99 per cento; un tipico specchio da parete è riflettente solo al 90 per cento.) I fotoni possono essere raccolti in un tale risonatore in modo 10 000 volte più efficiente che in un convenzionale risonatore laser. Gli specchi nel nostro laser a singolo atomo erano riflettenti al 99,9997 per cento e distanziati fra loro di circa un millimetro. I fotoni potevano essere fatti rimbalzare avanti e indietro all'incirca 250 000 volte prima di essere assorbiti dagli specchi o espulsi dal risonatore.

Purtroppo, è difficile mantenere la supercavità «accordata» con la frequenza dei fotoni emessi dagli atomi quando essi saltano allo stato di energia più basso. Se gli specchi si muovono anche di poco e la risonanza viene persa, non si producono le oscillazioni di Rabi e gli atomi nella cavità non emettono fotoni. Per garantire la risonanza atomo-cavità, abbiamo usato un trasduttore piezoelettrico - un cristallo dielettrico che converte una differenza di potenziale elettrico applicata in una tensione meccanica - per regolare lo spazio tra gli specchi. Un servocircuito controllava la spaziatura e correggeva ogni deviazione, anche minima, dalla distanza ottimale tra gli specchi.

Una questione altrettanto cruciale era la scelta di un atomo opportuno da immettere nel risonatore. L'atomo doveva avere una conveniente coppia di livelli energetici e una bassa velocità di emissione spontanea, perché questo processo avrebbe distrutto l'interazione tra l'atomo e la cavità. Decidemmo di usare atomi di bario, che emettono fotoni della lunghezza d'onda di 791 nanometri quando essi passano dallo stato eccitato allo stato fondamentale. Questi atomi venivano preparati facendo evaporare bario metallico in un forno e poi dirigendo il vapore verso la fessura tra gli specchi. Il forno produceva un sottile fascio di atomi di bario che viaggiavano alla velocità media di 360 metri al se-

Mark Gerber

L'intensità del fascio di un laser a singolo atomo aumenta bruscamente quando un flusso denso di atomi di bario entra nel risonatore. Quando il fascio è diffuso, la risposta del laser è molto più bassa. Il conteggio dei fotoni scende al livello di fondo se la frequenza di risonanza della cavità non uguaglia la frequenza dei fotoni emessi.

Le oscillazioni di Rabi - studiate per la prima volta dal fisico Isidor I. Rabi (*a sinistra*) - sono responsabili dell'emissione di fotoni nel laser a singolo atomo. Nello spazio vuoto, un atomo eccitato emette spontaneamente un fotone in una direzione casuale (*a*). In una cavità risonante, invece, l'atomo emette un fotone molto più velocemente verso gli specchi distanziati in modo preciso (*b*). Il processo è detto oscillazione di Rabi nel vuoto. Se un altro atomo eccitato entra nella cavità, la presenza del fotone fa sì che l'atomo sia sottoposto all'oscillazione di Rabi quantizzata. L'atomo emette un fotone identico nella stessa direzione, ma ancora più rapidamente (*c*).

condo. Poiché il risonatore era piccolo e la densità del flusso di atomi bassa, all'interno del risonatore non si trovava più di un atomo di bario alla volta.

Subito prima di entrare nella cavità, gli atomi di bario passavano attraverso un fascio di luce di un laser convenzionale al titanio-zaffiro, che era accordato esattamente in modo da eccitare gli atomi dallo stato fondamentale allo stato di energia più alta. In condizioni normali, gli atomi sarebbero tornati spontaneamente allo stato fondamentale mediamente in 3 milionesimi di secondo, emettendo fotoni della lunghezza d'onda di 791 nanometri. Poiché la cavità era costruita in modo da avere la stessa lunghezza d'onda risonante, forzava alcuni degli atomi di bario a emettere i loro fotoni durante i 200 miliardesimi di secondo in cui passavano tra i due specchi.

Quando il primo atomo entrava nel risonatore vuoto, la probabilità che subisse un'oscillazione di Rabi nel vuoto ed emettesse un fotone era pari al 23 per cento. Una volta che il primo fotone era emesso, tuttavia, il campo elettromagnetico creato all'interno del risonatore esercitava una influenza più intensa sul successivo atomo di bario che entrava nella cavità. La probabilità che questo atomo emettesse un fotone saliva così al 42 per cento. All'aumentare del numero dei fotoni nel risonatore, la probabilità di emissione fotonica aumentava sempre più. Inoltre, tutti i fotoni emessi avevano la stessa direzione e fase, definite dalla geometria del risonatore. Il risultato era un debole fascio di fotoni laser, trasmessi fuori dalla cavità in direzione perpendicolare al fascio di atomi.

A causa della bassa perdita del risonatore, i fotoni potevano essere trattenuti nella cavità per quasi un milionesimo di secondo, una durata notevole per gli standard atomici. Abbiamo stimato il numero di fotoni trattenuti nel nostro risonatore misurando l'intensità della luce trasmessa attraverso uno degli specchi della cavità con un rivelatore ad alta efficienza che poteva contare fino al 40 per cento dei fotoni che lo raggiungevano.

Nel nostro esperimento la produzione di fotoni continuava finché la velocità di perdita per assorbimento o trasmissione attraverso gli specchi uguagliava la velocità di emissione dei fotoni da parte degli atomi di bario. Eravamo in grado di variare la densità del fascio di atomi modificando la temperatura del bario nel forno. Quando il numero medio degli atomi nella cavità era di 0,1 – cioè quando la cavità era occupata da un atomo di bario per il 10 per cento del tempo – la produzione di fotoni era minima. La maggior parte dei fotoni emessi lasciava il risonatore prima che un altro atomo di bario potesse entrarvi. Ma quando aumentammo il valor medio degli atomi nella cavità fino a 0,4, gli atomi emettevano circa un milione di fotoni al secondo, abbastanza per mantenere un fotone nel risonatore per tutto il tempo. La presenza di un fotone nella cavità aumentava la probabilità di emissione addizionale di fotoni: quando spingemmo il numero medio degli atomi a 0,7 la potenza del laser aumentò di sette volte.

I laser del futuro

Il laser a singolo atomo è notevolmente efficiente. Quando i fotoni si accumulano nel risonatore, la probabilità che gli atomi di bario emettano un altro fotone può teoricamente raggiungere il 100 per cento. Nel nostro prototipo la probabilità di emissione raggiunse un massimo del 50 per cento, il che significava che metà dell'energia assorbita dagli atomi di bario era convertita in luce laser. La maggior parte dei laser convenzionali ha invece un'efficienza che varia tra l'1 e il 30 per cento circa.

Il vero valore del laser a singolo atomo sta nella sua utilità come strumento sperimentale. Siccome la luce laser è generata da fenomeni quanto-meccanici, gli scienziati possono verificare le previsioni della teoria quantistica producendo interazioni atomiche nel risonatore e osservando poi la risposta del dispositivo. Il nostro laser originale non era tuttavia l'ideale per questi esperimenti, in quanto le interazioni atomiche nel risonatore non erano uniformi. Il campo elettromagnetico nella supercavità aveva la forma di un'onda stazionaria tra gli specchi, con un'ampiezza che aumentava e diminuiva con andamento sinusoidale, come le vibrazioni di una corda tesa di un piano. A causa di questo effetto, le interazioni tra gli atomi e la cavità variavano con il percorso degli atomi: quelli che passavano attraverso aree di grande ampiezza emettevano fotoni, mentre quelli che passavano attraverso aree con ampiezza piccola rimanevano imperturbati.

Risolvemmo il problema inclinando leggermente il fascio atomico rispetto all'angolo di 90 gradi con l'orientazione degli specchi. A causa dello spostamento Doppler, l'atomo non «vede» più il campo come un'onda stazionaria, ma come una coppia di onde che si propagano in direzioni opposte. È possibile adattare la distanza tra gli specchi in modo che solo una delle onde sia in risonanza con l'atomo. L'accorgimento rende le interazioni atomiche più uniformi: poiché tutti gli atomi attraversano regioni di ampiezza sia alta sia bassa dell'onda che si propaga, condividono la stessa possibilità di emettere un fotone se passano attraverso lo stesso campo.

Un altro problema con il nostro laser era l'ampia distribuzione delle velocità degli atomi di bario che emergevano dal forno. Gli atomi più veloci che attraversavano la cavità avevano meno tempo per interagire con il campo, sicché era meno probabile che emettessero fotoni. Per rendere le velocità più uniformi, modificammo il sistema per eccitare gli atomi irraggiandoli con due laser convenzionali, così da essere sicuri che solo gli atomi con la velocità desiderata avrebbero raggiunto lo stato di energia più alta.

Apportati questi perfezionamenti, ci stiamo preparando ad analizzare lo spettro di emissione del laser a singolo atomo. Esperimenti precedenti avevano mostrato che un atomo all'interno di una cavità risonante interagisce con un fascio di luce proveniente da un laser convenzionale. Quando la cavità è vuota, l'intensità del fascio che la attraversa aumenta rapidamente quando la frequenza del laser approssima la frequenza di risonanza della cavità. In altri termini, la «curva di accordo» della cavità ha un singolo picco. Ma quando un atomo è all'interno della cavità, l'intensità del fascio laser trasmesso aumenterà specificamente per due frequenze, una superiore e una inferiore alla frequenza di risonanza. La curva di accordamento della cavità diventa a doppio picco.

Lo spettro di emissione di un laser a singolo atomo dovrebbe anch'esso diventare una curva a doppio picco quando il flusso degli atomi è poco denso, cioè quando l'intervallo di tempo tra gli atomi è molto più lungo del tempo di decadimento della cavità, e tutti i fotoni lasciano il risonatore prima che un altro atomo vi entri. Quando il flusso di atomi è più denso e i fotoni si accumulano nel risonatore, lo spettro d'emissione si dovrebbe modificare nella curva caratteristica a singolo picco della luce laser. Purtroppo, però, non sono disponibili previsioni teoriche di come questa transizione si verifichi. Fornendo gli spettri per le fasi intermedie, il laser a singolo atomo può migliorare la nostra conoscenza del modo in cui la luce laser si sviluppa dall'emissione caotica di fotoni.

Ci proponiamo inoltre di usare questo dispositivo per studiare lo «stato intrappolato», un fenomeno quantistico che si verifica quando un atomo eccitato entra nella cavità e subisce una o più oscillazioni di Rabi complete. Nel corso di un'oscillazione completa l'atomo emette un fotone all'interno della cavità e poi assorbe un fotone dal campo, lasciando il risonatore nello stato eccitato. Siccome l'atomo entra ed esce dalla cavità nello stesso stato, il numero dei fotoni nel campo non aumenta. Nel nostro esperimento originale non abbiamo osservato oscillazioni di Rabi complete, perché gli atomi di bario si muovevano troppo rapidamente; il tempo impiegato ad attraversare la cavità era appena sufficiente a consentire un sesto di oscillazione. È possibile studiare gli stati intrappolati solo se si rallenta il flusso degli atomi. Questo a sua volta ci richiede di aumentare l'intervallo di tempo entro il quale i fotoni possono essere mantenuti all'interno della cavità. Attualmente stiamo provando a triplicare il tempo di mantenimento del nostro risonatore.

Questi studi possono anche apportare un beneficio pratico: poiché gli stati intrappolati presentano un'incertezza molto bassa dell'ampiezza del campo, un laser a singolo atomo che opera in quel modo potrebbe essere usato per manipolare informazioni con basso rumore o per spettroscopia di precisione. Le conoscenze ottenute grazie al laser a singolo atomo potranno anche affrettare lo sviluppo di laser in microcavità a semiconduttore, ovvero minuscoli dispositivi che potrebbero un giorno essere usati per creare computer ottici. Molti ritengono che si potrebbe migliorare notevolmente l'efficienza di laser a semiconduttore se solo si potesse manipolare il processo fondamentale dell'emissione fotonica. Il laser a singolo atomo può aiutare a comprendere perfettamente questo processo, «illuminando» il mondo quantistico dell'interazione tra radiazione e materia.

MICHAEL S. FELD e KYUNGWON AN sono gli inventori del laser a singolo atomo. Feld è professore di fisica al Massachusetts Institute of Technology e direttore del George R. Harrison Spectroscopy Laboratory. Ha conseguito il Ph.D. al MIT nel 1967. I suoi lavori comprendono la prima dimostrazione della super-radianza nella regione ottica. Feld si è anche occupato di applicazioni biomediche dei laser e di spettroscopia. An ha conseguito il Ph.D. in fisica presso il MIT nel 1994; il laser a singolo atomo fu il progetto della sua tesi. Ha continuato a lavorare al MIT come ricercatore in ottica quantistica e in fisica atomica fino al gennaio 1998. Ora insegna al Korea Advanced Institute of Science and Technology a Taejon, nella Corea del Sud.

Gli autori ringraziano Chris Fang-Yen, Abdul Aljalal e Ramachandra R. Dasari per le utili discussioni. Questo lavoro è stato sostenuto dalla National Science Foundation con i finanziamenti PHY-9512056 e CHE-9304251.

HAROCHE SERGE e KLEPPNER DANIEL, *Cavity Quantum Electrodynamics* in «Physics Today», 42, n. 1, gennaio 1989.

RAITHEL G. e altri, *The Micromaser: A Proving Ground for Quantum Physics* in *Cavity Quantum Electrodynamics*, a cura di Paul R. Berman, Academic Press, 1994.

AN KYUNGWON, DASARI RAMACHANDRA R. e FELD MICHAEL S., *The Microlaser: A Fundamental Quantum Generator of Light* in *Atomic and Quantum Optics: High-Precision Measurements*, SPIE Proceedings Series, 2799, pp. 14-21, 1996.

I funghi, questi sconosciuti

Hanno un ruolo fondamentale nei cicli naturali e stanno destando interessi scientifici, in particolare in medicina e nelle biotecnologie, che fanno passare in secondo piano il loro uso gastronomico

di Luigi Cocchi e Luciano Vescovi

I funghi sono i più antichi organismi eucarioti: apparvero sulla Terra più di 500 milioni di anni fa. Anche il loro uso da parte dell'uomo è molto antico: tra gli oggetti ritrovati nello zaino dell'uomo di Similaun, risalente a più di 5000 anni fa, vi erano funghi allucinogeni essiccati; anche le popolazioni americane precolombiane utilizzavano funghi allucinogeni per le loro pratiche magiche, mentre già prima di Cristo i cinesi avevano inserito i funghi nella loro farmacopea. Sappiamo inoltre che i primi archibugi usavano come miccia la polvere essiccata di *Fomes fomentarius* (il termine latino *fomes* significa esca, alimento del fuoco). Più recentemente i funghi hanno avuto ruoli importanti in medicina (dai funghi vengono gli antibiotici e i farmaci antirigetto, ma anche malattie come micosi e allergie, oltre ai famigerati avvelenamenti) nonché nella produzione e conservazione degli alimenti.

In questa sede non ci proponiamo certo di parlare di tutti i funghi - un regno a sé stante con centinaia di migliaia di specie note e probabilmente altrettante da scoprire, a patto che non si distruggano gli habitat naturali e non si comprometta ulteriormente la biodiversità - ma solo dei macromiceti o funghi dei prati e dei boschi. La definizione di macromicete è puramente empirica perché, in pratica, individua solo i funghi i cui carpofori sono visibili a occhio nudo, ma si può comunque affermare che i macromiceti appartengono tutti alla divisione *Amastigomycota* (spore non flagellate, riproduzione almeno in parte sessuata) e alle sottodivisioni *Ascomycotina* (spore che compiono la meiosi dentro una cellula fertile, l'asco) che conta oltre 150 000 specie, e *Basidiomycotina* (spore che compiono la meiosi all'esterno della cellula fertile, detta in questo caso basidio) che conta alcune decine di migliaia di specie. Rispetto ai funghi micromiceti, tradizionalmente più studiati e conosciuti, i funghi macromiceti (che, da ora in avanti, chiameremo semplicemente funghi) sono ancora in gran parte ignoti - e non solo dal punto di vista della commestibilità - tanto da potere oggi essere considerati oggetto di ricerca scientifica di avanguardia.

Che cosa sono i funghi

Nel linguaggio comune, con il termine fungo si indica, in modo erroneo, il carpoforo (la sola parte visibile con vita effimera e la funzione di liberare nell'ambiente molti miliardi di spore, i «semi» dei funghi) prodotto dal corpo vero e proprio dei funghi che nella maggior parte dei casi, è sotterraneo - e pertanto invisibile - ed è costituito dalle ife, cellule filamentose e lasse che crescono solamente in lunghezza e che, nel loro complesso, formano il micelio. Questo può avere vita secolare e raggiungere dimensioni notevoli (un micelio può arrivare a estendersi per parecchie centinaia di metri).

Il ruolo biologico dei funghi è fondamentale per gli equilibri naturali, in particolare per i vegetali ai quali sono strettamente legati. Per comprendere la natura di questo legame va ricordato che i funghi sono esseri viventi che si collocano in un regno a sé stante grazie a caratteristiche che li differenziano sia dai vegetali sia dagli animali. Essi sono privi di clorofilla e perciò, come gli animali, sono organismi eterotrofi rispetto ai carboidrati (polisaccaridi come cellulosa e lignina fabbricati dalle piante a partire da acqua e anidride carbonica attraverso la fotosintesi clorofilliana). Ma mentre gli animali digeriscono la sostanza organica di cui si cibano all'interno del loro corpo, i funghi hanno una digestione esterna resa possibile dalla grande superficie di contatto fornita dal micelio, attraverso la quale immettono nell'ambiente esterno enzimi in grado di demolire le molecole dei nutrienti organici, riducendole a molecole inorganiche, ossia a sali minerali.

L'importanza dei funghi in natura sta proprio nella loro funzione di riciclatori di sostanza organica, consentendo in questo modo la chiusura dei cicli naturali e favorendo il nutrimento delle piante (i funghi sono da annoverare tra gli organismi detritivori, come i batteri, per merito dei quali la natura non produce rifiuti): da questo punto di vista i funghi simbionti sono fondamentali per

I funghi rivestono un ruolo fondamentale nei cicli naturali per le loro peculiari modalità di nutrimento. Le specie saprofite si nutrono di materia organica morta o dei prodotti di scarto dei viventi. I saprofiti terricoli, come *Agaricus campestris* (il comune prataiolo), utilizzano l'humus del terreno; i lignicoli, come *Pleurotus ostreatus* (l'orecchione), *Agrocybe aegerita* (il piopparello o pioppino) e varie specie dei generi *Pluteus* e *Polyporus*, vivono su tronchi e ceppaie; altri saprofiti, qui non rappresentati, vivono su aghi, pigne di conifere, residui legnosi a terra, resti carbonizzati, escrementi, cadaveri di animali o altri funghi in decomposizione. Disaggregando la sostanza organica, i saprofiti la trasformano in sali minerali riutilizzabili dalle piante e contemporaneamente mantengono il terreno in buone condizioni di illuminazione e apporto idrico. I funghi parassiti come *Armillariella mellea* (il chiodino) si nutrono di sostanza organica vivente spesso causando la morte dell'ospite (in tal caso trasformandosi in saprofiti). In un ambiente in equilibrio svolgono la funzione di eliminare gli individui più deboli, ma negli instabili equilibri dei nostri boschi possono provocare vere e proprie ecatombi di piante. I funghi simbionti - qui rappresentati da *Amanita phalloides* e da *Boletus edulis* (uno dei «porcini») - costituiscono un'evoluzione del parassitismo, in quanto sia il fungo sia la pianta sono avvantaggiati dalla vita in comune.

Un bosco di faggio sull'Appennino tosco-emiliano. Tutti i funghi, commestibili e non, svolgono un ruolo importantissimo nel mantenimento dell'ecosistema del bosco favorendo, grazie alle micorrize, la crescita delle piante. Purtroppo è proprio nel bosco che si vedono i risultati di una sostanziale ignoranza nei confronti dei funghi: calpestio e danneggiamento del sottobosco, rifiuti abbandonati, enormi quantità di funghi distrutti.

Da *Biologia: il punto di vista molecolare*, Zanichelli; elaborazione Laura Caleca

Da qualche decina d'anni il mondo dei viventi non è più diviso in due regni (animali e vegetali), ma in cinque: procarioti o monere (organismi con cellule prive di nucleo: batteri e cianobatteri o alghe azzurre); protisti (organismi unicellulari eucarioti, cioè con vero nucleo: rodofite o alghe rosse, clorofite o alghe verdi, sporozoi, ciliati, mixomiceti ecc.); animali (organismi eucarioti, eterotrofi e pluricellulari con dimensioni da microscopiche a macroscopiche e riproduzione generalmente sessuata); piante (organismi eucarioti, autotrofi e pluricellulari con riproduzione generalmente sessuata); funghi (organismi eucarioti, eterotrofi con riproduzione mediante spore sia sessuata sia asessuata). In particolare i funghi hanno cellule che, per la presenza di pareti e vacuoli, assomigliano alle cellule vegetali e per la presenza di chitina nelle pareti assomigliano alle cellule animali.

la produzione di lignina e cellulosa, che poi saranno rimineralizzate dai funghi parassiti e saprofiti.

Saprofitismo, parassitismo, simbiosi mutualistica sono le modalità, non sempre nettamente distinte anche all'interno di una singola specie, attraverso cui questo loro ruolo si esprime. Si definisce saprofita un essere vivente che si nutre di sostanza organica morta, e parassita quello che si nutre di sostanza organica vivente, con danno per l'ospite, che può anche morire (in tal caso il parassita si trasforma in saprofita). La simbiosi è invece una forma estremamente interessante di parassitismo evoluto al punto che dalla simbiosi trae vantaggio anche l'ospite: le piante in simbiosi con uno o più funghi diventano eterotrofe nei confronti dell'azoto e del fosforo. La simbiosi mutualistica, che si concretizza in un legame tra radici e micelio chiamato micorriza (dal greco *mykes,* fungo e *riza,* radice) ha avuto un successo biologico clamoroso; un esempio tipico sono i licheni, così importanti per l'ambiente e l'economia dei paesi nord-europei, costituiti da un'associazione simbiotica tra un'alga (organismo autotrofo, cioè vegetale con clorofilla) e un fungo (organismo eterotrofo le cui ife proteggono le cellule dell'alga ottenendo in cambio nutrimento).

Probabilmente l'evoluzione del parassitismo in simbiosi mutualistica è stata la strategia vincente rispetto alla necessità di reperire nutrimento da parte delle piante che, vivendo in foreste con suoli poveri di nutrienti e non potendo muoversi per cercare il cibo come gli animali, si sono adattate a utilizzare i miceli fungini che, di fatto, funzionano da moltiplicatori dell'apparato radicale per procurarsi le sostanze inorganiche da sintetizzare con la fotosintesi clorofilliana. Recentemente, tuttavia, alcune ricerche effettuate in Canada presso la British Columbia University - pubblicate sulla rivista «Nature» del 7 agosto 1997 - hanno evidenziato un ruolo inaspettato della simbiosi micorrizica, che sembra rovesciare l'immagine darwiniana convenzionale di lotta per la sopravvivenza. Con traccianti radioattivi si è verificato che la micorriza non favorisce la competizione, ma la collaborazione. Nella foresta studiata, gli abeti (*Pseudotsuga menziesii*) ricevono, attraverso il micelio di funghi simbionti, parte del carbonio fissato con la fotosintesi dalle betulle (*Betula papyrifera*), con amplificazione del fenomeno quando gli abeti sono in ombra. In questo caso il micelio dei funghi simbionti svolge un ruolo importante di promozione della biodiversità permettendo lo scambio di sostanze nutrienti tra piante di specie diversa.

D'altra parte la ricerca tesa a promuovere la «coltivazione» dei funghi incontra forti difficoltà proprio nel caso dei funghi simbionti, in testa a tutti i tartufi pregiati e i porcini. Per ora la coltivazione di funghi su scala industriale riguarda esclusivamente alcuni funghi saprofiti: per esempio, uno tra i funghi più venduti nei supermercati, *Agaricus bisporus*, lo *champignon* di cui si producono migliaia di tonnellate l'anno, è saprofita terricolo-coprofilo, mentre *Pleurotus ostreatus*, l'«orecchione», è saprofita lignicolo.

Anche le modalità riproduttive dei miceli fungini sono poco conosciute: si sa che, quando le condizioni ambientali sono favorevoli, la germinazione delle spore (cellule aploidi, cioè con corredo genetico dimezzato, come i gameti degli animali) produce un micelio primario che, incontrandosi con un altro micelio primario di sesso diverso, produce un micelio secondario fertile che è dotato di corredo genetico normale, essendosi sviluppato da una cellula diploide, corrispondente allo zigote degli animali (*si veda la figura in alto a pagina 86*).

	AUTOTROFI	ETEROTROFI			
	PRODUTTORI	CONSUMATORI PRIMARI	CONSUMATORI SECONDARI	CONSUMATORI TERZIARI	DECOMPOSITORI
ECOSISTEMA	I° livello trofico	II° livello trofico	III° livello trofico	IV° livello trofico	
BOSCO	quercia	bruco	merlo	lupo	batteri e funghi
PROFONDITÀ MARINE	batteri	vermi tubicoli	granchio		batteri
MARE APERTO	fitoplancton	zooplancton	sgombro	tonno	vermi marini

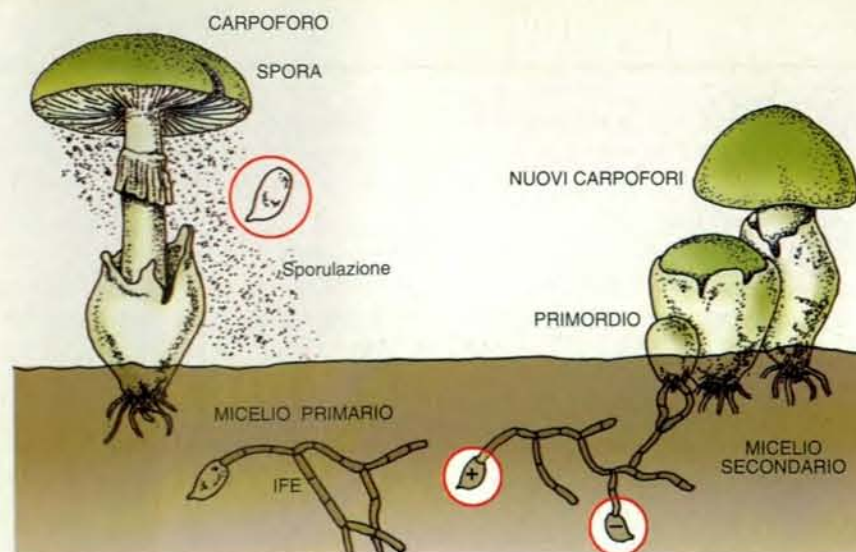
Disegno di Laura Caleca

Attraverso alcuni esempi sono qui schematizzati gli stretti rapporti di dipendenza tra organismi autotrofi ed eterotrofi. I vegetali sono organismi autotrofi, capaci cioè di fabbricare e immagazzinare cibo utilizzando la luce solare; come produttori primari di sostanza organica essi costituiscono la base della catena alimentare e forniscono la maggior parte dell'ossigeno che respiriamo. Sia gli animali sia i funghi sono eterotrofi: in altre parole si nutrono di sostanza organica già prodotta. Il ruolo particolare dei funghi consiste nel fatto che, come decompositori di sostanza organica, consentono il ritorno della sostanza organica rimineralizzata nella catena alimentare naturale.

I funghi come bioindicatori

In anni relativamente recenti i funghi hanno cominciato a essere considerati per una serie di proprietà che vanno ben al di là del loro valore gastronomico e riguardano il loro metabolismo e la struttura chimica delle molecole estremamente complesse che li compongono.

Uno dei settori in cui i funghi possono trovare importanti applicazioni è quello della cosiddetta bioindicazione, ossia della valutazione dello stato di inquinamento di un ambiente. È noto che in un ambiente naturale le specie simbionti sono molto più numerose di quelle parassite e saprofite, mentre in un ambiente antropizzato, a maggior ragione se inquinato, le proporzioni si rovesciano; e questo è già un elemento, seppure grossolano, di bioindicazione. Ma recenti ricerche condotte in vari paesi del mondo (Francia, Svizzera, Italia, Germania e Stati Uniti) hanno evidenziato con maggiore precisione l'utilità, ai fini della bioindicazione, dei funghi, segnalando la loro capacità di concentrare vari elementi chimici, tra cui metalli pesanti (argento, cadmio, mercurio, piombo, ma anche cromo, selenio, vanadio, zinco, zirconio) e isotopi radioattivi (soprattutto cesio 137 e 134, ma anche potassio 40, un radionuclide naturale).

Per quanto riguarda i metalli pesanti si è rapidamente diffusa l'idea che le alte concentrazioni presenti nei funghi fossero indice di inquinamento ambientale della zona di crescita. Noi abbiamo tuttavia trovato elevatissime concentrazioni di cadmio (simili alle concentrazioni presenti nei fanghi di depurazione delle zincature) in diverse specie di *Agaricus*, in particolare *A. macrosporus*, tutte considerate ottime commestibili, raccolte in terreni non contami-

Il ciclo riproduttivo dei funghi è molto complesso e ancora relativamente poco conosciuto, ma si sa che a una riproduzione vegetativa che avviene per frammentazione del micelio si può alternare, in condizioni favorevoli, una riproduzione sessuata. Come mostra il disegno, il carpoforo produce spore aploidi che germinando nel terreno generano un micelio formato da ife aploidi (micelio primario). L'incontro tra due miceli primari aploidi di sesso diverso dà origine a un micelio secondario in grado di produrre nuovi carpofori.

nati d'alta quota, e quindi con un fattore di accumulo (rapporto tra la concentrazione nel carpoforo e quella nel terreno) di parecchie centinaia. La stessa situazione si presenta per l'argento (in *Agaricus bitorquis* il fattore di accumulo per questo metallo può essere maggiore di 1800) e il mercurio, ma non per il piombo (con qualche eccezione).

Secondo noi, quindi, prima di poter utilizzare una specie fungina come efficace bioindicatore di un certo inquinante, è necessario essere in grado di distinguere la frazione della concentrazione della sostanza dovuta a contaminazione da quella presente per motivi naturali. Per il piombo la questione è un po' diversa. Questo elemento presenta infatti fattori di accumulo generalmente inferiori a 1 e la sua presenza nei funghi è chiaramente legata alla crescita in ambiente urbano (fanno eccezione alcune specie come *Calvatia utriformis*, una delle più grosse «vesce», che presenta alte concentrazioni di piombo anche in prati di alta quota, sopra la fascia della vegetazione arborea).

Ma perché certe specie fungine concentrano elementi chimici in misura così elevata? Quali sono i meccanismi biochimici e i metaboliti che entrano in funzione? È possibile che attraverso lo studio del biochimismo dei funghi si possano individuare nuove molecole in grado di imprigionare metalli pesanti?

Le stesse domande possono essere poste a proposito della presenza di radioattività nei funghi. Il gruppo micologico ed ecologico di Reggio Emilia, di cui fanno parte gli autori, ha voluto effettuare le misure di radioattività in varie specie fungine, anche al di là della «moda» del momento scatenata dall'incidente di Chernobyl. I dati raccolti hanno consentito di cambiare il quadro interpretativo emerso in seguito alle prime misure: le specie fungine che concentrano maggiormente radioattività (si considerano solo gli isotopi di cesio in quanto, fortunatamente, nelle emissioni di Chernobyl non erano presenti in quantità significative isotopi più pericolosi, come lo stronzio 90) sono quelle saprofite con micelio superficiale (come *Cantharellus lutescens* o finferla, saprofita degli aghi di conifere caduti a terra) attive solo nel breve periodo, mentre le specie veramente concentratrici sul lungo periodo sono specie simbionti di latifoglie le cui radici - e quindi i miceli con esse in simbiosi - sono più profonde di quelle delle conifere. In particolare, semplici calcoli hanno dimostrato che specie del genere *Tricholoma* (*T. album*, *T. sulphurescens*, *T. inamoenum*) e *Rozites caperatus* presentano una contaminazione radioattiva che è precedente all'incidente di Chernobyl ed è stata provocata dalla ricaduta al suolo del cesio emesso dalle esplosioni nucleari avvenute in atmosfera e cessate negli anni settanta (quando non si pensava a misurare la radioattività nei funghi).

L'importanza di individuare le specie fungine che concentrano i diversi elementi chimici e i radionuclidi non è limitata al loro uso diretto come alimenti, ma è ulteriormente rafforzata dal fatto che i funghi e il materiale che essi degradano rappresentano il cibo di molte specie animali (insetti, lumache, roditori, caprioli, cinghiali eccetera) che si inseriscono nella catena alimentare che può arrivare fino all'uomo.

I funghi e la bioremediation

La rimozione di sostanze inquinanti con agenti biologici, una tecnica che normalmente si associa a metodi fisici e chimici, è ormai comunemente nota

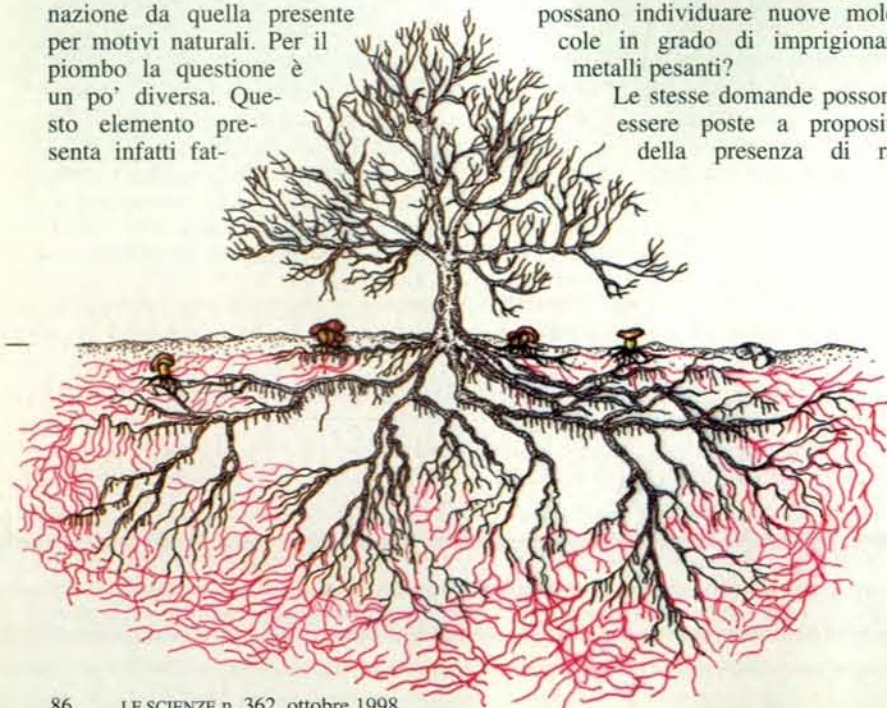
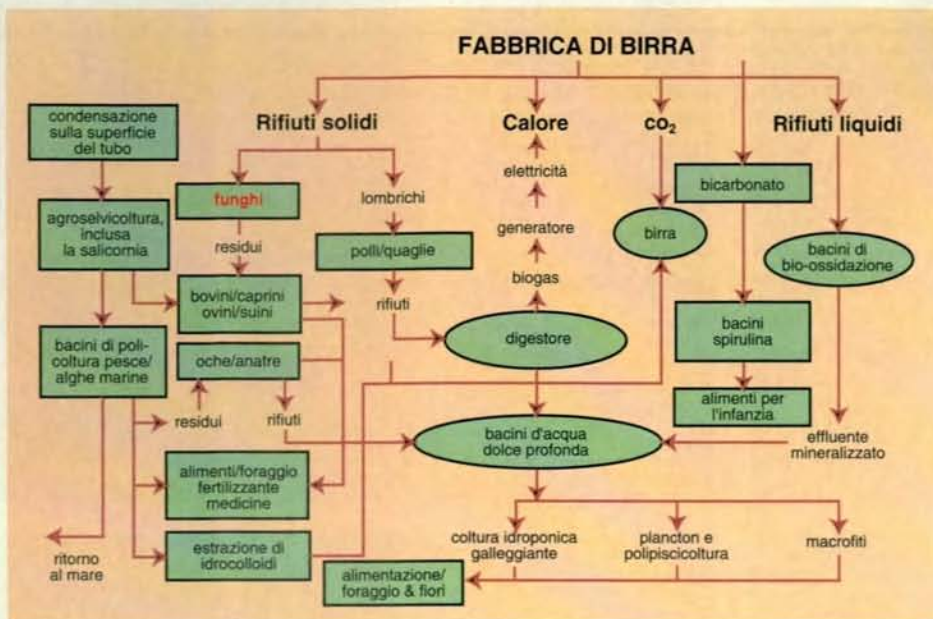
Le piante riescono a crescere più sane e robuste grazie alla simbiosi con i funghi. Il fungo, eterotrofo, assume dalla pianta, autotrofa, la sostanza organica fabbricata con la fotosintesi clorofilliana, mentre la pianta amplia, attraverso il micelio fungino, la sua superficie assorbente radicale.

Molti funghi hanno la proprietà di concentrare metalli pesanti e altri elementi presenti nel terreno. *Agaricus macrosporus* (*in alto a sinistra esemplari allo stato di primordio con imenio ancora chiuso*), un prataiolo reperibile sia in pianura sia in alta montagna ritenuto ottimo commestibile, è un forte concentratore di cadmio, argento e mercurio, anche se raccolto in zone non inquinate. In particolare per il cadmio, su materiale secco, sono risultate concentrazioni che superano i 200 milligrammi per chilogrammo, analoghe a quelle dei fanghi di depurazione di zincature. Abbiamo calcolato che per raggiungere la dose di cadmio che l'OMS consiglia di non superare in una settimana bastano 50 grammi di *A. macrosporus* freschi. *Amanita muscaria* (*in basso a sinistra*), il ben noto fungo velenoso, concentra vanadio e, unico organismo a quanto ci risulta, zirconio.

***Cantharellus lutescens* (*in alto a destra*), la rinomata finferla, è stato il fungo che nell'immediato ha concentrato maggiormente il cesio radioattivo emesso da Chernobyl. Oggi non è più contaminato, a meno che, quando apparirà tra settembre e dicembre, non segnali il cesio fuoriuscito recentemente in Spagna. *Rozites caperatus* (*in basso a destra*), commestibile e ricercato, è ancora oggi contaminato dal cesio di Chernobyl oltre i limiti CEE, in particolare se raccolto nei boschi di latifoglia. Ciò significa che, sul lungo periodo, i funghi maggiormente concentratori di cesio radioattivo sono simbionti di latifoglia, probabilmente già contaminati prima dell'incidente di Chernobyl (quando non si pensava a misure di radioattività nei funghi) a causa del cesio radioattivo rilasciato dagli esperimenti nucleari in atmosfera cessati negli anni settanta.**

Diateca del Gruppo micologico ed ecologico «R. Franchi», Reggio Emilia (Associazione micologica Bresadola)

come *bioremediation*. Sono già in uso metodi di risanamento di acque contaminate che impiegano le piante (fitorisanamento) e sono in corso di sperimentazione varie ricerche con altri organismi ritenuti capaci di concentrare notevoli quantità di metalli pesanti e di radionuclidi. Anche i funghi, insieme con batteri ed enzimi degradativi, sono oggetto di queste ricerche che si propongono, tra l'altro, di individuare i geni che specificano proteine in grado di aumentare la tolleranza ai metalli pesanti da parte degli organismi viventi. In effetti le altissime concentrazioni di elementi chimici, in particolare di metalli pesanti, presenti nei funghi anche in situazioni normali possono far pensare che i funghi simbionti svolgano il ruolo di «depuratori» dei cicli naturali. È probabile che esista una comunicazione tra i due elementi della simbiosi, pianta e fungo, che consente di sequestrare una molecola anomala inseritasi - per motivi naturali, per inquinamento o altro - nel ciclo pianta-fungo, aumentandone la concentrazione nel carpoforo senza danneggiarlo. Anzi, è addirittura possibile che certi elementi chimici, metalli pesanti compresi, rivestano un ruolo enzimatico che favorisce la crescita dei carpofori (cadmio e mercurio nel genere *Agaricus*; selenio nei generi *Boletus* e *Albatrellus*; cloro, vanadio, zirconio nel genere *Amanita*; arsenico in *Sarcosphaera eximia*, in alcune specie del genere *Inocybe*, in *Boletus pulverulentus*; e così via). È interessante il caso dell'accumulo di zirconio in

Da *Svolte epocali. Il business per un futuro migliore*, Baldini & Castoldi, 1997

Un processo di produzione integrata, come quello (qui schematizzato) dello stabilimento per la produzione di birra realizzato in Namibia, consente di abbattere a livelli trascurabili l'emissione di inquinanti moltiplicando al tempo stesso produttività e posti di lavoro.

Amanita muscaria, perché non ci risulta esistano altri organismi in grado di concentrare tale elemento.

Produrre a «emissione zero»

In tempi in cui si discute di sviluppo ecologicamente sostenibile potrebbe essere decisivo realizzare cicli produttivi a «produzione integrata». Un interessante esperimento è in corso in Namibia, gestito dalla locale università in collaborazione con lo Zero Emission Research Initiative della United Nations University, di cui è direttore Gunter Pauli (si veda *Inquinare meno produrre di più*, intervista a Gunter Pauli in «Le Scienze» n. 346, giugno 1997). Si tratta di una fabbrica di birra i cui residui sono trattati in modo da ottenere prodotti ad alto valore aggiunto. I passaggi del processo si avvalgono di lombrichi e funghi per produrre mangime per animali e, successivamente, biomassa che, assieme ai liquami, alimenta un digestore anaerobico che produce biogas. L'acqua scaricata dalla birreria alimenta una vasca per piscicoltura e, successivamente, è usata per irrigare e fertilizzare i campi.

Il ruolo dei funghi consiste in particolare nell'attaccare e degradare le fibre legnose dei cascami solidi della birreria per ottenere ottimo foraggio.

Le prospettive in campo farmaceutico

Oltre agli usi tradizionali che sono molti e spesso curiosi (per esempio il *Fomes* ricordato all'inizio veniva usato dai chirurghi come emostatico), ci sono buone speranze di poter scoprire applicazioni farmaceutiche per le molte molecole ancora sconosciute che sappiamo essere presenti nei funghi. È accertato che nei funghi (in alcune specie degli ordini *Polyporales* e *Boletales* e in *Agaricus bisporus*) sono presenti molecole con azione citostatica e citotossica che, in vitro, si sono dimostrate attive sulle cellule tumorali. Anche la temibile *Amanita phalloides*, il fungo velenoso per antonomasia, sembra contenga sostanze antitumorali che, ovviamente, potranno essere utilizzate solo se si riuscirà a sintetizzare un loro derivato non tossico per le cellule sane. Altre amanite come *A. muscaria* e *A. pantherina* possiedono molecole che sono servite come modello strutturale per la messa a punto di farmaci ad azione anticonvulsivante, analgesica e ipotensiva.

Nel *Boletus luridus* e in varie specie del genere *Hygrophorus* sono stati rinvenuti inibitori delle prostaglandine e nel *Ganoderma lucidum* si sono scoperti princìpi attivi ad azione antiallergica, ipotensiva, ipocolesterolemica. Ancora più recentemente sono state individuate in *Lentinus edodes* (un fungo saprofita lignicolo, di origine asiatica, che viene coltivato su legno di faggio e betulla) molecole con proprietà immuno-stimolanti che forse potrebbero venire impiegate contro le immunodeficienze e in particolare contro l'AIDS.

Il ruolo dei funghi nella riforestazione

La riforestazione svolge un ruolo strategico per il futuro dell'umanità e ha valenze ambientali ed economiche molto rilevanti. Poiché i quattro quinti delle piante terrestri sono interessate dal fenomeno della micorriza e la crescita delle piante è fortemente favorita dalla simbiosi mutualistica, soprattutto in terreni poveri, è naturale pensare che un utilizzo scientificamente condotto di piante micorrizate possa produrre vantaggi a vari livelli. Già «Le Scienze» ha affrontato in modo esauriente tale problematica in due articoli, citati in bibliografia, di Paola Bonfante Fasolo e Silvia Perotto. In questa sede vogliamo solo sottolineare quanto sarebbe importante da parte dei raccoglitori di funghi, ma anche da parte dei legislatori e degli amministratori, acquisire consapevolezza del ruolo dei funghi nel complesso ecosistema del bosco. Il fatto è che, purtroppo, nel definire i funghi come «prodotti del sottobosco» li si considera di fatto «sottoprodotti del bosco», quindi senza valore ecologico ma solo di mercato, perdendo così di vista la salvaguardia del patrimonio vero, anche in termini economici, rappresentato dal loro habitat.

***Ganoderma lucidum*, un saprofita e parassita lignicolo di consistenza coriacea, vive nei boschi di latifoglia. Usato già nell'antichità, in particolare in Cina, per curare varie malattie, ha dimostrato di contenere molecole farmacologicamente attive tra cui polisaccaridi di antitumorali e ipoglicemici, proteine immunomodulatorie, princìpi chemioprotettori, inibitori dell'aggregazione piastrinica, agenti antinfiammatori con minori effetti collaterali di quelli oggi in commercio.**

Insetto divoratore di vegetali aggredito e ucciso da un fungo per lui patogeno.

Da *Biotecnologie*, UTET periodici, Milano, 1997

Il problema della commestibilità

Vogliamo solo brevemente accennare a tale questione che, rispetto alle problematiche accennate, ci sembra di secondaria importanza. Tuttavia, anche per questo aspetto, le ricerche in atto possono riservare alcune sorprese. Il fatto sopra ricordato che funghi tradizionalmente considerati ottimi commestibili, come *Agaricus macrosporus*, concentrino in grande misura cadmio, deve far riflettere e invitare alla prudenza nel consumo dei funghi, anche nei confronti di specie per le quali non si corre il rischio di avvelenamenti in senso tradizionale.

Per ora ci limitiamo a fornire i seguenti consigli: non consumare mai funghi provenienti da zone inquinate (aree urbane, insediamenti industriali, vie a intenso traffico eccetera); non fare uso indiscriminato di funghi del genere *Agaricus* (i comuni prataioli); fare un uso moderato di tutti i funghi, i cui tessuti sono sempre ricchi di chitina, la stessa sostanza, difficile da digerire, che forma, per esempio, l'esoscheletro dei granchi; infine si raccomanda a donne in gravidanza, bambini e malati di fegato o di reni di eliminare i funghi dalla loro dieta.

LUIGI COCCHI e LUCIANO VESCOVI hanno iniziato nel 1986, dopo l'incidente di Chernobyl, una ricerca sulla capacità dei funghi superiori di concentrare isotopi radioattivi ed elementi chimici, che ha ottenuto, nel 1994, il patrocinio e un contributo finanziario dalla Provincia di Reggio Emilia e che è condotta in convenzione-collaborazione con il Servizio di igiene pubblica dell'AUSL, con l'ARPA e con l'Azienda Gas Acqua Consorziale di Reggio Emilia. Entrambi sono soci del Gruppo micologico ed ecologico «R. Franchi» di Reggio Emilia (Associazione micologica Bresadola), di cui Cocchi è vicepresidente e membro del Comitato scientifico nazionale. Luigi Cocchi si è laureato in fisica teorica presso l'Università di Parma nel 1972 e attualmente insegna all'IPSIA «A. Lombardini» di Reggio Emilia. Luciano Vescovi, perito chimico, è tecnico di laboratorio presso l'Azienda Gas Acqua Consorziale di Reggio Emilia, che ha messo a disposizione i propri laboratori per la maggior parte delle analisi chimiche sui funghi descritte in questo articolo.

BONFANTE FASOLO P., *Le micorrize*, in «Le Scienze» n. 128, 1979.

BELVISI M. e altri, *Caratterizzazione di alcuni ecosistemi terrestri attraverso l'uso di miceti e di altre matrici ambientali significative a essi correlate: un contributo metodologico*, ENEA, Roma, 1989.

BONFANTE FASOLO P. e PEROTTO S., *La cooperazione tra piante e funghi simbionti*, in «Le Scienze» n. 284, 1992.

LEPP N.W., *Uptake and Accumulation of Metals in Bacteria and Fungi*, in *Biogeochemistry of Trace Metals*, pp. 277-298, Lewis Publishers, Londra, 1992.

COCCHI L. e altri, *I funghi come biosensori di inquinamento radioattivo. Uno studio sulle specie* Cantharellus lutescens *e* Rozites caperatus, Atti del 2° Convegno nazionale sugli avvelenamenti da funghi, Rovereto (TN), in «Supp. Ann. Mus. Civ. Rovereto (TN)», 8, pp. 285-291, 1993.

LISIEWSKA M., *Funghi e biotecnologie*, in «Micologia Italiana», I, pp. 45-51, 1993.

ROMEO F. e DEL SIGNORE A., *La presenza di micro e macroelementi nei funghi: una rassegna*, in «Rivista merceologica», 33 (IV), pp. 255-308, 1994.

CAMPANELLA L. e altri, *I funghi quali sistemi bioaccumulatori di inquinanti*, in «Inquinamento», 11, pp. 46-52, 1994.

DOJMI DI DELUPIS G. e F., *Contaminazione di funghi commestibili con mercurio, cadmio e piombo*, Rapporto ISTISAN 96/36, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 1996.

COCCHI L. e VESCOVI L., *Considerazioni sul contenuto di elementi chimici nei funghi. Argento, cadmio, mercurio e piombo nel genere* Agaricus, in «Rivista di Micologia», 1, pp. 53-72, 1997.

L'eterno fascino dei giochi matematici

L'autore della celebre rubrica di matematica ricreativa, nata su «Scientific American» e pubblicata anche da «Le Scienze», rievoca 25 anni di divertenti rompicapo e importanti scoperte

di Martin Gardner

«Il divertimento è uno dei campi della matematica applicata.»
- William F. White, *A Scrapbook of Elementary Mathematics*

La rubrica *Giochi matematici* ebbe inizio nel numero del dicembre 1956 di «Scientific American» con un articolo sugli esaflexagoni. Queste curiose strutture, che si generano piegando una striscia di carta in modo da formare un esagono e poi incollandone le estremità, potevano essere rivoltate ripetutamente, rivelando una o più facce nascoste. La loro invenzione risale al 1939 e si deve a un gruppo di giovani laureati della Princeton University. Gli esaflexagoni sono divertenti, ma quello che più conta è che mettono in luce il legame tra i rompicapo ricreativi e la matematica «seria»: fra i loro inventori vi era un tale Richard Feynman, che divenne poi uno dei più famosi fisici teorici del nostro secolo. (Questo e altri giochi, pubblicati prima della nascita di «Le Scienze», sono raccolti nel volume *Enigmi e giochi matematici* di Martin Gardner, Sansoni, Firenze 1972.)

Martin Gardner continua a cimentarsi con i rompicapo matematici nella sua casa di Hendersonville, in North Carolina. Lo scrittore, che ha ora 83 anni, è qui ritratto con una bottiglia di Klein, un oggetto che ha una sola superficie.

Negli anni in cui iniziai a curare la rubrica, erano stati pubblicati ben pochi libri di matematica ricreativa. Il classico del genere - *Mathematical Recreations and Essays*, scritto da W. W. Rouse Ball nel 1892 - era disponibile nella versione aggiornata da un'altra figura leggendaria, lo studioso canadese di geometria H. S. M. Coxeter. La Dover aveva dato alle stampe una traduzione dal francese di *La mathématique des jeux*, del teorico dei numeri belga Maurice Kraitchik. A parte qualche altra raccolta di rompicapo, questo era tutto.

Da allora si è assistito a una vera esplosione di libri sull'argomento, molti dei quali scritti da eminenti matematici. Tra gli autori si annoverano Ian Stewart, l'autore della rubrica *L'angolo matematico*, rubrica che l'anno prossimo riprenderà in «Le Scienze»; John H. Conway della Princeton University; Richard K. Guy dell'Università di Calgary; infine, Elwyn R. Berlekamp dell'Università della California a Berkeley. Con sempre maggiore frequenza, inoltre, compaiono articoli di matematica ricreativa sui periodici matematici. Nel 1968 iniziò le pubblicazioni la rivista trimestrale «Journal of Recreational Mathematics».

La linea che separa la matematica da intrattenimento dalla matematica seria è sottile e indistinta. Molti matematici professionisti considerano il loro lavoro una sorta di gioco, si sentono un po' come professionisti del golf o della pallacanestro. In generale, la matematica è considerata ricreativa se ha un aspetto giocoso che può essere capito e apprezzato anche dai non matematici: comprende problemi elementari con soluzioni eleganti e allo stesso tempo sorprendenti, nonché paradossi inquietanti, giochi ingegnosi, sconcertanti trucchi magici e curiosità topologiche come le strisce di Möbius e le bottiglie di Klein. In effetti, quasi tutte le branche della matematica più semplici del calcolo differenziale hanno aree che possono essere considerate ricreative. (Nella pagina a fronte sono illustrati alcuni divertenti esempi.)

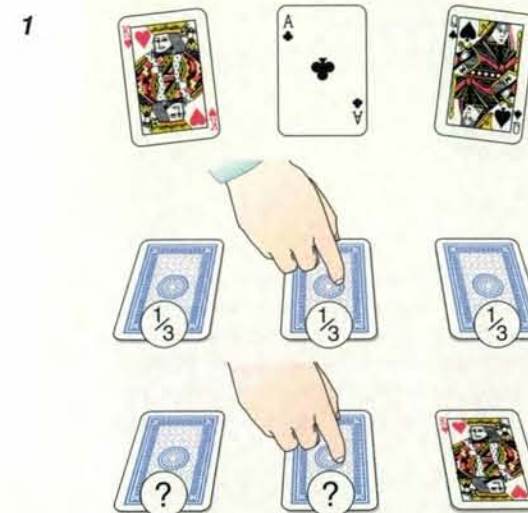
Il gioco del filetto a scuola

Purtroppo moltissimi insegnanti continuano a ignorare il potenziale educativo della matematica divertente. Per 40 anni ho fatto del mio meglio per convincere gli educatori che la matematica ricreativa andrebbe inserita nel normale programma di studio come un modo per suscitare l'interesse degli studenti

Quattro rompicapo di Martin Gardner

(le risposte sono a pagina 99)

Illustrazioni di Ian Worpole

1

Jones, un giocatore d'azzardo, mette tre carte coperte sul tavolo. Una delle carte è un asso; le altre sono due figure. Voi appoggiate il dito su una delle carte, scommettendo che sia l'asso. Ovviamente, la probabilità che lo sia realmente è pari a 1/3. Ora Jones dà una sbirciatina di nascosto alle tre carte. Dato che l'asso è uno solo, almeno una delle carte che *non* avete scelto deve essere una figura. Jones la volta e ve la fa vedere. A questo punto, qual è la probabilità che ora il vostro dito sia sull'asso?

2

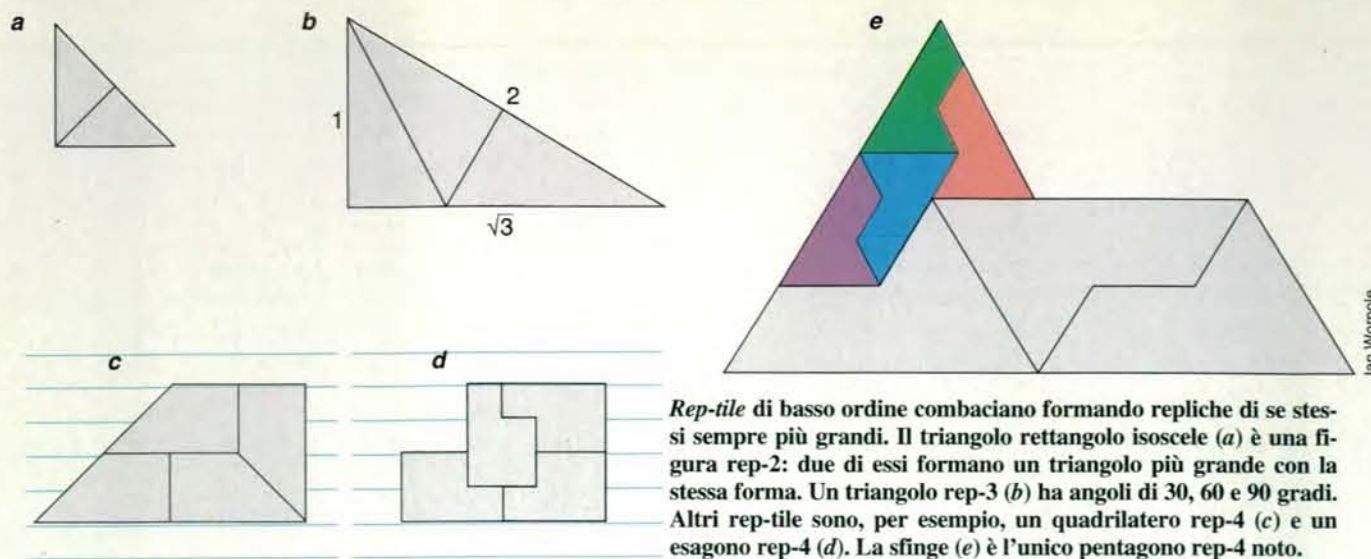
28	26	30	27	29	25
34	32	36	33	35	31
16	14	18	15	17	13
4	2	6	3	5	1
10	8	12	9	11	7
22	20	24	21	23	19

Questa matrice di numeri è un caso curioso di quadrato magico. Fate un cerchio intorno a un numero, poi barrate tutti i numeri della stessa colonna e della stessa riga. Poi cerchiate un altro numero che non sia stato barrato e di nuovo barrate la riga e la colonna che lo contengono. Continuate a questo modo finché avete cerchiato sei numeri. Ogni numero è stato scelto a caso ma, indipendentemente dai numeri che avete scelto, la loro somma è sempre la stessa. Qual è questa somma? E, ciò che più importa, perché il trucco funziona sempre?

3

Sono qui riprodotti i primi tre versetti della *Genesi* nella Bibbia di re Giacomo. Scegliete una qualsiasi delle 10 parole che compongono il primo versetto: *In the beginning God created the heaven and the earth.* Contate il numero di lettere della parola scelta e chiamate *x* questo numero. Andate poi alla parola che si trova *x* parole più avanti. (Per esempio, se avete scelto *in*, andate a *beginning.*) Di nuovo, contate il numero di lettere di questa parola, *n*, e procedete di altre *n* parole. Continuate a questo modo finché la vostra catena di parole entra nel terzo versetto della *Genesi*. Su quale parola termina il conteggio? La risposta è un caso o fa parte di un piano divino?

4

Un mago dispone un mazzo di carte in modo che le carte nere e quelle rosse siano alternate. Quindi taglia il mazzo, assicurandosi che le carte sul fondo delle due metà non siano dello stesso colore. A questo punto vi lascia mescolare insieme le due metà, a vostro piacimento. Quando avete terminato l'operazione, prende le prime due carte dall'alto del mazzo. Sono una carta nera e una carta rossa (non necessariamente nell'ordine). Le due carte successive sono a loro volta una nera e una rossa. Anzi, tutte le coppie di carte successive saranno costituite da una carta rossa e una nera. Come mai? Perché mescolando il mazzo non si ottiene una successione casuale?

Rep-tile di basso ordine combaciano formando repliche di se stessi sempre più grandi. Il triangolo rettangolo isoscele (*a*) è una figura rep-2: due di essi formano un triangolo più grande con la stessa forma. Un triangolo rep-3 (*b*) ha angoli di 30, 60 e 90 gradi. Altri rep-tile sono, per esempio, un quadrilatero rep-4 (*c*) e un esagono rep-4 (*d*). La sfinge (*e*) è l'unico pentagono rep-4 noto.

nei confronti delle meraviglie della matematica. Finora, però, il progresso in questa direzione è stato impercettibile.

Mi è capitato spesso di raccontare un aneddoto dei miei anni di scuola superiore che illustra bene questo problema. Un giorno, durante l'ora di matematica, dopo aver finito i miei esercizi tirai fuori un foglio nuovo e cercai di risolvere un problema che aveva suscitato il mio interesse: se nel gioco del filetto il primo a giocare possa vincere sempre, ovviamente adottando la strategia giusta. Vedendomi scrivere, l'insegnante mi strappò il foglio di mano e disse: «Nella mia ora di lezione, Gardner, mi aspetto che ti occupi di matematica e di nient'altro».

Il problema del filetto sarebbe un meraviglioso esercizio da svolgere in classe. È un modo splendido per presentare agli studenti la matematica combinatoria, la teoria dei giochi, la simmetria e la probabilità. Per di più, il gioco fa parte dell'esperienza di tutti gli studenti: chi non ha giocato a filetto da ragazzo? Eppure conosco pochi insegnanti che abbiano incluso il gioco nelle loro lezioni.

Negli Stati Uniti l'ultima moda nell'insegnamento della matematica è la «nuovissima matematica», così chiamata per distinguerla dalla «nuova matematica» che fallì miserevolmente alcuni decenni or sono. Il sistema di insegnamento consiste nel dividere le classi in piccoli gruppi di studenti che hanno il compito di risolvere problemi attraverso la cooperazione. Questo insegnamento interattivo, così viene chiamato, sostituisce la lezione vera e propria. Benché vi siano alcuni aspetti positivi nella nuovissima matematica, sono rimasto colpito dal fatto che le raccomandazioni per gli insegnanti non facciano parola della matematica ricreativa, che si presta così bene alla soluzione cooperativa di problemi.

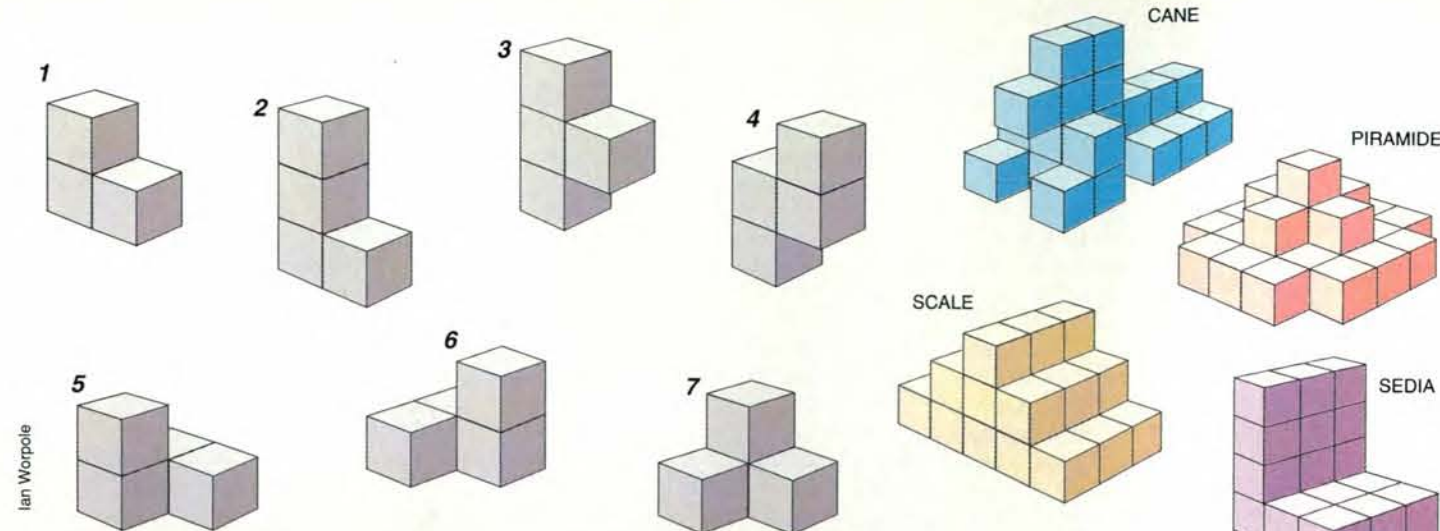
Vorrei proporre agli insegnanti un esperimento. Chiedete agli studenti di pensare a un qualsiasi numero di tre cifre, che chiameremo *ABC*, e poi di inserire due volte sulle loro calcolatrici questa successione di tre cifre, formando il numero *ABCABC*. Per esempio, se gli studenti hanno pensato il numero 237, dovrebbero battere 237 237. Informate poi gli studenti che avete la facoltà di predire che *ABCABC* diviso 13 non ha resto. La cosa risulterà vera. Ora dite loro di dividere il risultato per 11. Di nuovo, non ci sarà un resto. Infine, chiedete di dividere per 7. Ed ecco che sul display della calcolatrice compare il numero originale *ABC*. Il segreto è semplice: $ABCABC = ABC \times 1001 = ABC \times 7 \times 11 \times 13$. (Come tutti gli altri interi, 1001 può essere scomposto in un unico insieme di fattori primi.) Chiedere agli studenti di spiegare perché il trucco funziona sempre sarebbe la migliore introduzione alla teoria dei numeri e alle proprietà dei primi.

Polimini e tasselli di Penrose

Uno dei risvolti più piacevoli dei 25 anni di collaborazione con «Scientific American» è stato conoscere un così gran numero di veri matematici. Io sono solo un giornalista che ama la matematica e riesce a scriverne con una certa facilità. Non ho studiato matematica all'università. I miei articoli si raffinavano con il crescere delle mie conoscenze, ma ciò che ha reso popolare la rubrica era il materiale affascinante che riuscivo a raccogliere da alcuni dei migliori matematici del mondo.

Solomon W. Golomb, della University of Southern California, fu uno dei primi a fornire ispirazione per la rubrica. Nel numero del maggio 1957 parlai dei suoi studi sui polimini, forme che si ottengono congiungendo quadrati identici lungo gli spigoli. Il domino - formato da due quadrati - può avere una sola forma, ma il trimino, il tetramino e il pentamino possono avere forme diverse: L, T, quadrati e così via. Uno dei primi problemi ideati da Golomb era stabilire se un certo insieme di polimini, fatti combaciare l'uno con l'altro, poteva coprire una scacchiera senza lasciare caselle vuote. Lo studio dei polimini divenne presto un settore fiorente della matematica ricreativa. Lo scrittore di fantascienza Arthur C. Clarke confessò di essere diventato «drogato» di pentamini dopo aver iniziato a giocare con quelle figure ingannevolmente semplici.

Golomb attirò anche la mia attenzione su una classe di figure che egli chiamava *rep-tile* [gioco di parole intraducibile sui termini *tile*, piastrella, tassello, e *reptile*, rettile], poligoni identici che fatti combaciare danno origine a repliche di se stessi di dimensioni maggiori. Uno di essi è «la sfinge», un pentagono irregolare di forma vagamente simile a quella dell'antico monumento egiziano. Unendo correttamente quattro sfingi identiche, si ottiene una sfinge più grande della stessa forma. I *rep-tile* si possono espandere indefinitamente: tassellano il piano con repliche sempre più grandi.

Il compianto Piet Hein, illustre inventore e poeta danese, divenne un mio buon amico attraverso i suoi contributi ai *Giochi matematici*. Nel numero del luglio 1957 scrissi a proposito di un gioco da lui inventato, l'Hex, per il quale serve una scacchiera a forma di diamante costituita da esagoni. I giocatori mettono i loro contrassegni sugli esagoni e cercano di completare per primi una catena ininterrotta da un lato all'altro della scacchiera.

I pezzi Soma sono forme irregolari che si ottengono unendo le facce di cubi unitari (*qui sopra*). I sette pezzi possono essere disposti in 240 modi diversi per formare il cubo Soma 3 per 3 per 3; con gli stessi pezzi si possono creare anche tutte le strutture rappresentate qui a destra, tranne una. Riuscite a determinare quale delle strutture non si può costruire? La risposta è a pagina 99.

Hein inventò anche il cubo Soma, che fu argomento di numerosi articoli (settembre 1958, luglio 1969 e settembre 1972, nessuno dei quali tradotto in «Le Scienze»). Esso è formato da sette diversi policubi - gli analoghi tridimensionali dei polimini - ottenuti unendo le facce di cubi identici. I policubi possono essere accostati a formare il cubo Soma - in non meno di 240 modi - e tutta una varietà di forme Soma: la piramide, la vasca da bagno, il cane e così via.

Nel 1970, il matematico John Conway - un genio indiscusso - mi venne a trovare e mi chiese se avessi un scacchiera per l'antico gioco orientale del go. Quando la presi, Conway mi mostrò come funziona Vita, un gioco di simulazione che aveva inventato e che ora è notissimo. Metteva numerosi gettoni sulla griglia della scacchiera, poi toglieva o aggiungeva nuovi gettoni secondo tre semplici regole: un gettone con due o tre vicini può rimanere; un gettone senza vicini, o con quattro o più vicini, viene tolto; e un nuovo gettone viene aggiunto in ogni spazio vuoto adiacente a esattamente tre gettoni. Applicando ripetutamente queste regole, si può creare un incredibile numero di forme, alcune delle quali si muovono lungo la scacchiera come insetti.

Descrissi Vita in un articolo pubblicato su «Le Scienze» nel maggio 1971, e il gioco divenne subito un successo tra i patiti del calcolatore. Per molte settimane, aziende e laboratori di ricerca quasi si bloccarono perché gli entusiasti di Vita erano impegnati a sperimentare nuove forme sui loro schermi.

In seguito, Conway collaborò con i colleghi matematici Richard Guy ed Elwyn Berlekamp a quello che a mio giudizio costituisce il maggior contributo alla matematica ricreativa di questo secolo, un lavoro in due volumi dal titolo *Winning Ways* (1982). Una delle centinaia di gemme che contiene è un gioco per due persone chiamato Phutball, che si può giocare su una scacchiera per il go. La Phutball viene messa al centro della scacchiera e i giocatori sistemano a turno i loro gettoni sulle intersezioni della griglia della scacchiera. I giocatori possono muovere la Phutball facendola saltare sopra i gettoni, che vengono tolti dalla scacchiera quando sono superati. L'obiettivo del gioco è portare la Phutball al di là della linea di meta del lato opposto, costruendo una catena di gettoni attraverso la scacchiera. Ciò che rende particolare il gioco è che, a differenza della dama, degli scacchi, del go o dell'Hex, Phutball non assegna pezzi diversi ai contendenti: i giocatori usano gli stessi gettoni per costruire le loro catene. Di conseguenza, qualsiasi mossa fatta da un giocatore può essere fatta e sfruttata anche dal suo avversario.

Tra gli altri matematici che hanno sfornato idee per la rubrica c'è Frank Harary, attualmente alla New Mexico State University, che ideò una versione generalizzata del filetto. Nella versione di Harary, presentata in «Le Scienze» di agosto 1979, l'obiettivo non era formare

una linea diritta di X o di O; i giocatori, invece, cercavano di realizzare per primi con i loro X e O un particolare polimino, come una L o un quadrato. Ronald L. Rivest, del Massachusetts Institute of Technology, mi permise di rivelare per primo - in «Le Scienze» del dicembre 1977 - il sistema cifrato a chiave pubblica che aveva contribuito a inventare. Si trattava del primo di una serie di cifrari che rivoluzionarono la criptologia. Ebbi anche il piacere di far conoscere l'arte matematica di Maurits C. Escher, che apparve sulla copertina del numero di aprile 1961 di «Scientific American», così come la tassellatura non periodica scoperta da Roger Penrose, il fisico matematico inglese famoso per il suo lavoro sulla relatività e i buchi neri.

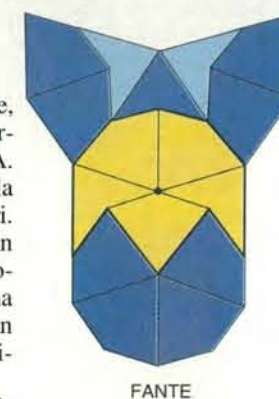
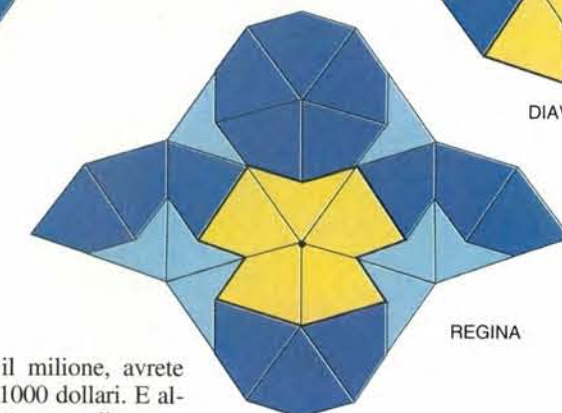
I tasselli di Penrose sono un esempio meraviglioso di come una scoperta nata unicamente per divertimento possa rivelare un'inattesa applicabilità pratica. Penrose ideò due tipi di forme, gli «aquiloni» e le «frecce», che coprono il piano solo in modo non periodico: nessuna parte fondamentale del disegno si ripete. Spiegai la rilevanza della scoperta nel numero del maggio 1977 di «Le Scienze», che riportava in copertina un disegno fatto con i tasselli di Penrose. Qualche anno dopo, una forma tridimensionale di tassellatura di Penrose divenne la base per la costruzione dei quasicristalli, un tipo di struttura molecolare sconosciuto in precedenza. Da allora, i fisici hanno scritto centinaia di articoli sui quasicristalli e sulle loro peculiari proprietà termiche e vibrazionali. Anche se l'idea di Penrose aveva in origine uno scopo strettamente ricreativo, essa aprì la strada a un settore del tutto nuovo della fisica dello stato solido.

Lo sciacquone di Leonardo

I due articoli che suscitarono la maggiore attenzione - almeno a giudicare dalle lettere ricevute - furono quello del pesce d'aprile e quello sul paradosso di Newcomb. Nell'articolo burla, uscito nel numero dell'aprile 1975 di «Scientific American» e in quello di settembre 1975 di «Le Scienze», si fingeva di rivelare grandi novità nella scienza e nella matematica.

Tra le scoperte sorprendenti c'erano una confutazione della teoria della relatività e la rivelazione che Leonardo da Vinci aveva inventato lo sciacquone. L'articolo annunciava anche che, negli scacchi, l'apertura di pedone di torre h2-h4 era una mossa che portava il Bianco alla vittoria certa e che e elevato a $\pi \times \sqrt{163}$ era esattamente uguale all'intero 262 537 412 640 768 744. Con mia grande meraviglia, migliaia di lettori non si resero conto che l'articolo era uno scherzo. Il testo era accompagnato da una complessa mappa in cui, a mio dire, erano necessari cinque colori per essere certi che due regioni vicine non avessero mai lo stesso colore. Centinaia di lettori mi inviarono copie della mappa colorata con solo quattro colori, confermando così il teorema dei quattro colori. Molti di essi affermavano che questo compito aveva richiesto giorni di lavoro.

Il paradosso di Newcomb prende il nome dal fisico William A. Newcomb, che lo ideò, ma deve la sua prima descrizione al filosofo Robert Nozick, della Harvard University, che ne parlò in un articolo tecnico. Esso prevede due scatole chiuse, A e B. La scatola A contiene 1000 dollari. La scatola B può contenere un milione di dollari oppure nulla. Avete due scelte: prendere solo la scatola B oppure entrambe le scatole. Prenderle tutte e due sembra ovviamente la scelta migliore, ma c'è una trappola: un essere superiore - Dio, se volete - ha il potere di conoscere in anticipo la vostra scelta. Se vede che la vostra avidità vi porta a prendere entrambe le scatole, lascia B vuota e voi dovete accontentarvi dei 1000 dollari che si trovano in A. Ma se prevede che prenderete solo la scatola B, ci mette un milione di dollari. Voi avete osservato altri cimentarsi in questo gioco, e tutte le volte che il giocatore ha scelto entrambe le scatole, ha trovato B vuota. E ogni volta che un giocatore sceglieva solo la scatola B, diventava milionario.

Quale dovrebbe essere la vostra scelta? Il ragionamento pragmatico dice che, visti gli esiti delle partite a cui avete assistito, l'essere superiore ha il potere di fare previsioni esatte. Dovreste quindi prendere solo la scatola B per garantirvi il milione. Ma attenzione! L'essere superiore fa la sua previsione *prima* che iniziate il gioco e non ha alcun potere di modificarla. Nel momento in cui fate la vostra scelta, la scatola B è vuota o contiene un milione di dollari. Se è vuota, scegliendo la scatola B non avrete proprio nulla, mentre se scegliete entrambe le scatole avrete almeno i 1000 dollari di A. E se B contiene il milione, avrete quel milione più altri 1000 dollari. E allora che cosa ci perdete a scegliere entrambe le scatole?

Entrambe le argomentazioni sembrano inattaccabili, ma nessuna delle due può essere la strategia giusta. Nozick concludeva che il paradosso, che appartiene a una branca della matematica chiamata teoria delle decisioni, rimane irrisolto. Secondo me il paradosso, conducendo a una contraddizione logica, dimostra l'impossibilità di un essere superiore in grado di prevedere le decisioni. Parlai del paradosso in «Le Scienze» del gennaio 1974 e ricevetti una tale valanga di lettere che le misi tutte in uno scatolone e le consegnai personalmente a Nozick, il quale le analizzò in un articolo ospitato dalla mia rubrica nel numero dell'agosto 1974.

I quadrati magici sono da molto tempo popolari nella matematica ricreativa. Ciò che li rende magici è la disposizione dei numeri al loro interno: i numeri in ogni colonna, riga e diagonale hanno la stessa somma. In genere si richiede che i numeri di un quadrato magico siano diversi tra loro e siano in ordine consecutivo, a partire da uno. Esiste solo un quadrato magico di ordine 3, in cui le cifre da uno a nove sono disposte

Le forme del gioco Vita si evolvono seguendo le regole elaborate dal matematico John H. Conway. Se all'inizio si dispongono quattro organismi in un blocco quadrato di celle (*a*), la forma non cambia. Altre tre figure iniziali (*b*, *c* e *d*) si evolvono nella forma stabile «alveare». La quinta figura (*e*) si evolve nell'oscillante «semaforo», che passa in alternanza dalle righe verticali a quelle orizzontali.

Ian Worpole

$$\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$$

I tasselli di Penrose si possono costruire dividendo un rombo in un «aquilone» e una «freccia», tali per cui il rapporto tra le loro diagonali sia ϕ, ossia il rapporto aureo (*sopra*). Disponendo cinque frecce intorno a un vertice si crea una stella. Sistemando 10 aquiloni intorno alla stella ed estendendo la tassellatura in modo simmetrico, si genera la figura a stella infinita (*a destra*). Altre tassellature intorno a un vertice sono, per esempio, il diavolo, il fante e la regina, le quali possono a loro volta generare figure infinite (*in basso a destra*).

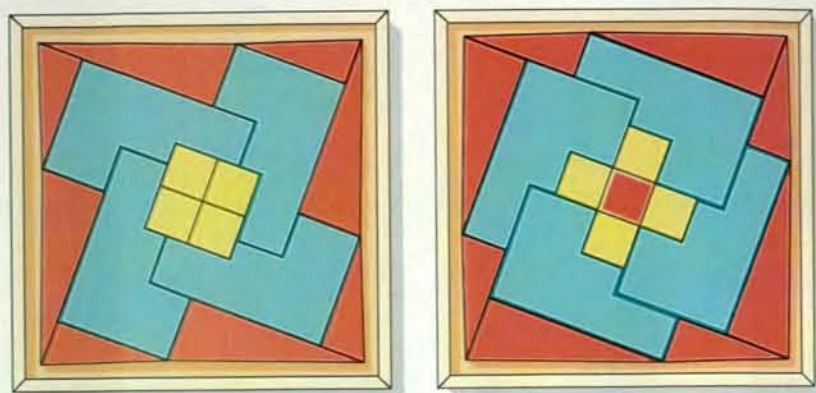
FANTE

DIAVOLO

REGINA

Ian Worpole

Il paradosso dell'area che scompare

Consideriamo le figure qui sotto. Ciascuna di esse è costruita con gli stessi 16 pezzi: quattro grandi triangoli rettangoli, quattro piccoli triangoli rettangoli, quattro pezzi con otto lati e quattro piccoli quadrati. Nella figura a sinistra, i pezzi combaciano perfettamente, ma la figura di destra ha un buco quadrato al centro! Da dove salta fuori questo pezzetto di area in più? E perché scompare nella figura a sinistra?

Ian Worpole

La chiave del «paradosso dell'area che scompare» sta nel fatto che i triangoli grandi e quelli piccoli delle due figure non sono simili: i loro angoli acuti sono leggermente diversi. A causa di questa differenza, la prima figura è concava: gli angoli ai vertici sono leggermente inferiori a 90 gradi e i lati della figura rientrano. Nell'altra figura gli angoli ai vertici sono leggermente maggiori di 90 gradi e i lati sporgono all'esterno. La differenza di area tra le due figure è pari all'area del buco quadrato nel centro della seconda. Questo rompicapo fu ideato per la rubrica del maggio 1961.

in una griglia tre per tre. (Le varianti ottenute per rotazione o riflessione sono considerate banali.) Esistono, invece, 880 quadrati magici di ordine 4 e il numero di possibilità cresce rapidamente per quadrati di ordine superiore.

Sorprendentemente, questo non avviene con gli esagoni magici. Nel 1963 ricevetti un esagono magico di ordine 3 inventato da Clifford W. Adams, un impiegato in pensione. Lo inviai a Charles W. Trigg, un matematico del Los Angeles City College, il quale dimostrò che questa elegante disposizione era l'unico esagono magico di ordine 3, e che non era possibile alcun esagono magico di altre dimensioni!

E se non viene richiesto che i numeri del quadrato magico siano in ordine consecutivo? Se l'unico requisito è che i numeri siano diversi fra loro, si può costruire una grande varietà di quadrati magici di ordine 3. Per esempio, esiste un numero infinito di questi quadrati che contengono numeri primi distinti. Si può costruire un quadrato magico con nove numeri distinti che siano quadrati? Due anni fa, in un articolo apparso su «Quantum», ho offerto 100 dollari per un quadrato del genere. Finora nessuno si è fatto avanti con il quadrato di quadrati, ma nessuno ha nemmeno dimostrato che sia impossibile. Se esiste, i suoi numeri devono essere enormi, forse al di là delle possibilità offerte dai più veloci supercalcolatori attuali. È probabile che un simile quadrato magico non abbia alcuna utilità pratica. Perché, allora, i matematici lo stanno cercando? Semplicemente perché potrebbe esistere.

L'incredibile dottor Matrix

Più o meno ogni anno, dedicavo un numero della rubrica a un'intervista immaginaria con un numerologo che avevo battezzato dottor Irving Joshua Matrix (si noti il 666 ottenuto con il numero di lettere delle tre parti del nome). Il dottore discettava di inconsuete proprietà dei numeri e di bizzarri giochi di parole. Molti lettori pensavano che il dottor Matrix e la sua bella figlia per metà giapponese, Iva Toshiyori, esistessero realmente. Ricordo una lettera di un lettore giapponese, sconcertato perché Toshiyori era un cognome davvero strano: in giapponese significa infatti strada dei vecchi: lo avevo preso da una cartina di Tokyo...

Rimpiango di non aver mai chiesto al dottor Matrix la sua opinione sul ridicolo best-seller *The Bible Code*, pubblicato nel 1997, in cui si sostiene di poter trovare previsioni del futuro nella disposizione delle lettere ebraiche dell'Antico Testamento. Il libro utilizza un sistema cifrato che avrebbe reso orgoglioso il dottor Matrix. Applicando selettivamente il sistema a certi brani di testo, i lettori possono trovare profezie nascoste non solo nell'Antico Testamento, ma anche nel Nuovo Testamento, nel Corano, nel «Wall Street Journal», e perfino nelle pagine dello stesso *The Bible Code*.

L'ultima volta che ho avuto notizie del dottor Matrix, era a Hong Kong, alla ricerca della comparsa accidentale di π in note opere di fantascienza. Citava, per esempio, il seguente frammento di frase del capitolo IX di *La guerra dei mondi* di H. G. Wells: *For a time I stood regarding...* (Rimasi un po' a osservare...). Le lettere delle parole danno π fino alla sesta cifra!

MARTIN GARDNER tenne la rubrica *Giochi matematici* su «Scientific American» dal 1956 al 1981, e continuò a collaborare saltuariamente per diversi anni. I suoi articoli sono raccolti in quindici libri, l'ultimo dei quali, pubblicato da Springer-Verlag nel 1997, è *The Last Recreations*. Durante la sua lunga carriera di giornalista scientifico ha scritto anche più di 70 altri libri, di scienza, matematica, filosofia, letteratura.

GARDNER MARTIN, *Circolo matematico*, Sansoni, Firenze 1981.

AVERBACH BONNIE e CHEIN ORIN, *Mathematics: Problem Solving through Recreational Mathematics*, W. H. Freeman and Company, 1986.

BALL W. W. ROUSE e COXETER H. S. M., *Mathematical Recreations and Essays*, 13° edizione, Dover Publications, 1987.

WELLS DAVID, *Penguin Edition of Curious and Interesting Geometry*, Penguin, 1991.

PICKOVER CLIFFORD, *Mazes of the Mind*, St. Martin's Press, 1992.

GARDNER MARTIN, *Enigmi e giochi matematici*, Rizzoli, Milano 1997.

In Italia, molti dei libri di Martin Gardner sono stati tradotti dall'editore Zanichelli. Tra essi: *L'incredibile dottor Matrix* (1982), *L'universo ambidestro* (1983), *Ah! Ci sono! Paradossi stimolanti e divertenti* (1987).

Risposte ai quattro rompicapo di Gardner

(pubblicati a pagina 93)

1. Molti pensano che la probabilità sia salita da 1/3 a 1/2. Dopo tutto, ci sono solo due carte coperte, e una deve essere l'asso. In realtà la probabilità rimane 1/3. La probabilità che *non* abbiate scelto l'asso rimane 2/3, anche se Jones sembra aver eliminato parzialmente l'incertezza mostrando che una delle due carte non prescelte non è l'asso. La probabilità che l'altra delle due carte non prescelte sia l'asso, tuttavia, resta uguale a 2/3, perché la scelta era avvenuta prima. Se Jones vi desse l'opportunità di spostare la vostra scommessa su quella carta, dovreste accettare (sempre che non abbia qualche carta nella manica, naturalmente).

Quando presentai questo problema nella mia rubrica dell'ottobre 1959, lo feci in forma leggermente diversa: invece di tre carte, il problema prevedeva tre prigionieri, uno dei quali era stato graziato dal governatore. Nel 1990 Marilyn vos Savant, autrice di una popolare rubrica sulla rivista «Parade», presentò un'altra versione ancora del problema, con tre porte e un'automobile dietro una di esse. Diede la risposta corretta, ma ricevette migliaia di lettere infuriate - molte da matematici - che l'accusavano di ignorare la teoria della probabilità! Il caso finì in prima pagina sul «New York Times».

2. La somma è 111. Il trucco funziona sempre perché la matrice di numeri non è altro che una vecchia tavola di addizioni. La tavola è generata da due insiemi di numeri: (3, 1, 5, 2, 4, 0) e (25, 31, 13, 1, 7, 19). Ciascuno dei numeri della matrice è la somma di una coppia di numeri dei due insiemi. Quando scegliete i sei numeri da cerchiare, state scegliendo sei coppie che insieme includono tutti e 12 i numeri generatori. Quindi la somma dei numeri circolettati è sempre uguale alla somma dei 12 numeri generativi. Questi particolari quadrati magici furono il tema della mia rubrica del gennaio 1957.

	3	1	5	2	4	0
25	(28)	26	30	27	29	25
31	34	32	36	33	(35)	31
13	16	14	(18)	15	17	13
1	4	2	6	(3)	5	1
7	10	(8)	12	9	11	7
19	22	20	24	21	23	(19)

3. Tutte le catene di parole terminano su *God* (Dio). La risposta può sembrare frutto della Provvidenza, ma in realtà è il risultato del Conteggio di Kruskal, un principio matematico messo in luce per la prima volta negli anni settanta dal matematico Martin Kruskal. Quando il numero totale di parole di un testo è maggiore in modo significativo del numero di lettere della parola più lunga, è probabile che due catene di parole che iniziano in modo casuale si intersechino in una parola chiave. Da quel punto, naturalmente, le catene diventano identiche. Più il testo è lungo, più la probabilità dell'intersezione aumenta.

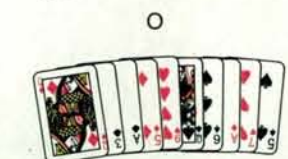
Ian Worpole

Parlai del principio di Kruskal in «Le Scienze» di giugno 1978. Il Conteggio di Kruskal si può applicare anche a occupazioni più mondane, come i trucchi con le carte.

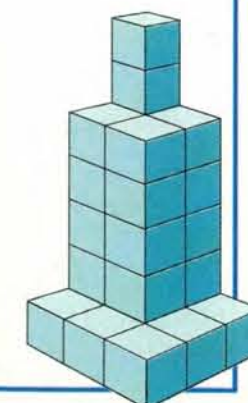
4. Immaginiamo, per semplicità, un mazzo di sole 10 carte, con la seguente alternanza di carte rosse e nere: NRNRNRNRNR. Tagliando in due il mazzo si otterrà la seguente successione: NRNRN e RNRNR. Quando si inizia a mescolare, la carta sul fondo di un mazzetto è nera, e quella sul fondo dell'altro mazzetto è rossa. Se la carta rossa arriva sul tavolo per prima, le carte sul fondo di entrambi i mazzetti saranno nere, e quindi la carta successiva creerà sul tavolo una coppia rosso-nero. Se invece scende per prima la carta nera, le carte sul fondo di entrambi i mazzetti saranno rosse, e quindi la carta successiva creerà una coppia rosso-nero. Dopo che sono scese le prime due carte - indipendentemente dal mazzetto a cui appartengono - la situazione sarà identica all'inizio: le carte sul fondo dei mazzetti saranno di colore diverso. Il processo si ripete per il resto del mazzo, garantendo che in ciascuna coppia successiva ci siano una carta nera e una rossa, anche se le carte si mescolano in maniera irregolare (*sotto*).

MAZZO BEN MESCOLATO

MAZZO MESCOLATO IRREGOLARMENTE

O

Questo fenomeno è noto come principio di Gilbreath, dal nome dello scopritore, Norman Gilbreath, un prestigiatore californiano. Ne parlai per la prima volta nella mia rubrica dell'agosto 1960 e di nuovo nel numero di marzo 1973 di «Le Scienze». I prestigiatori hanno inventato più di 100 trucchi con le carte che si basano su questo principio e le sue generalizzazioni.

L'esagono magico ha una proprietà peculiare: ogni riga di caselle ha per somma 38.

Il grattacielo non può essere costruito con pezzi Soma. **(Il rompicapo è a pagina 95.)**

L'agricoltura con acqua di mare

La continua crescita demografica e la scarsità delle riserve d'acqua dolce fanno crescere l'interesse per i progetti di irrigazione con acqua salata

di Edward P. Glenn, J. Jed Brown e James W. O'Leary

La Terra può anche essere il «Pianeta degli oceani», ma la maggior parte degli organismi terrestri - uomo compreso - dipende per la propria nutrizione da piante irrigate da acqua dolce, proveniente dalla pioggia o da corsi d'acqua. Nessuna delle cinque principali piante alimentari - frumento, mais, riso, patata e soia - tollera il sale: l'esposizione all'acqua marina le fa deperire e morire nel giro di pochi giorni.

Uno dei problemi globali più urgenti è quello di trovare acqua e terreni a sufficienza per soddisfare i fabbisogni alimentari. La Food and Agriculture Organization (FAO) delle Nazioni Unite stima che nei prossimi 30 anni saranno necessari 200 milioni di ettari di nuove terre coltivabili solo per nutrire la popolazione in rapida crescita dei paesi tropicali e subtropicali. Tuttavia in queste stesse nazioni sono disponibili solo 93 milioni di ettari per l'espansione delle colture, e gran parte di essi è coperta da foreste che vanno conservate. Occorrono quindi fonti alternative di acqua e terreni per la produzione agricola.

Salicornia bigelovii cresce generalmente nelle zone umide costiere. Dato che è in grado di prosperare in presenza di acqua marina, questa pianta è la più promettente fra quelle finora individuate per introdurre l'irrigazione con acqua di mare nelle zone desertiche costiere. *Salicornia* può essere consumata dal bestiame e i suoi semi forniscono un olio commestibile dal gusto di noce.

Richard Jones

Abbiamo valutato la fattibilità di un'agricoltura basata sull'acqua marina e abbiamo visto che funziona bene nei suoli sabbiosi degli ambienti desertici. Si definisce agricoltura basata sull'acqua marina la coltivazione di piante adatte a essere irrigate con acqua pompata dall'oceano. Non vi è penuria di acqua di mare: il 97 per cento dell'acqua sulla Terra si trova negli oceani. Anche i terreni desertici sono abbondanti: il 43 per cento dell'area continentale totale è arido o semiarido, sebbene solo una piccola frazione sia abbastanza vicino al mare da permettere questa forma di agricoltura. Stimiamo che il 15 per cento dei terreni oggi inutilizzati lungo le coste e nei deserti salini interni sia adattabile a usi agricoli sfruttando l'acqua di mare per l'irrigazione. Si tratta di un totale di 130 milioni di ettari di nuovi terreni che potrebbero essere destinati alla produzione alimentare per l'uomo o per gli animali, senza abbattere foreste o sottrarre preziosa acqua dolce agli usi per cui è indispensabile.

L'idea di irrigare le colture con l'acqua di mare non è nuova: anzi, cominciò a essere presa in seria considerazione dopo la seconda guerra mondiale. Nel 1949 Hugo ed Elisabeth Boyko si trasferirono nella città di Eilat sul Mar Rosso per bonificare il suolo in vista di futuri insediamenti israeliani. Dato che l'acqua dolce era un problema, i Boyko sfruttarono un pozzo salmastro e acqua pompata direttamente dall'oceano e riuscirono a dimostrare che molte piante sopportano una salinità superiore ai loro limiti normali in un suolo sabbioso. Sebbene molte delle idee dei Boyko su come le piante tollerino il sale non abbiano superato la prova del tempo, il loro lavoro suscitò enorme interesse per un possibile ampliamento dei limiti dell'agricoltura irrigua tradizionale.

L'agricoltura basata sull'acqua di mare deve soddisfare due requisiti per essere economicamente conveniente. In primo luogo, deve produrre piante utili con rese abbastanza alte da giustificare il costo del pompaggio di acqua marina per l'irrigazione. In secondo luogo, non deve danneggiare l'ambiente. Superare questi ostacoli si è rivelato arduo, ma non impossibile.

Lo sviluppo dell'agricoltura basata sull'acqua di mare ha seguito due direzioni. Alcuni studiosi hanno tentato di modificare colture convenzionali, come orzo e frumento, in modo da impartire loro resistenza al sale marino. Per esempio, il gruppo di ricerca di Emanuel Epstein presso l'Università della California a Davis ha dimostrato fin dal 1979 che varietà di orzo fatte crescere per generazioni in presenza di bassi livelli di sale erano in grado di produrre piccole quantità di cereale quando erano irrigate con acqua marina, più salata. Purtroppo gli sforzi compiuti in seguito per aumentare la tolleranza al sale delle colture convenzionali attraverso incroci selettivi e ingegneria genetica - ossia inserendo direttamente nelle piante i geni della tolleranza - non hanno prodotto buone candidate all'irrigazione con acqua di mare. Il limite superiore di salinità per la coltivazione a lungo termine anche delle piante più resistenti al sale, come la palma da dattero, è comunque inferiore a cinque parti per 1000, ossia meno del 15 per cento del sale contenuto nell'acqua di mare. L'acqua marina normale ha salinità del 35 per mille, ma nelle acque prossime ai deserti costieri, come nel Mar Rosso, nel Golfo della California settentrionale e nel Golfo Persico, la salinità è di solito più vicina al 40 per mille. (Il cloruro di sodio è il sale più comune nell'acqua di mare e anche il più nocivo per la crescita delle piante.)

Il nostro approccio è stato quello di sperimentare in coltura piante selvatiche alofite (che tollerano il sale) potenzialmente utilizzabili come alimento, foraggio e fonte di oli commestibili. La nostra idea era che cambiare la fisiologia di base di una tradizionale pianta coltivata, facendola diventare resistente al sale, fosse molto più arduo e complesso che coltivare una pianta selvatica già tollerante al sale. Dopo tutto, le colture moderne discendono da piante che un tempo erano selvatiche. In effetti, certe alofite - come *Distichlis palmeri*, che produce semi commestibili - furono consumate per generazioni dai popoli che vivevano presso la foce del Colorado nel Golfo di California.

Cominciammo i nostri esperimenti raccogliendo diverse centinaia di specie di alofite di tutto il mondo e analizzandone in laboratorio la loro tolleranza al sale e le loro proprietà nutrizionali. Esistono da 2000 a 3000 specie di alofite, che comprendono erbe e arbusti, ma anche alberi come le mangrovie, e occupano un'ampia gamma di habitat, dalle paludi costiere ai più aridi deserti salini. In collaborazione con il gruppo di ricerca di Dov Pasternak alla Ben Gurion University of Negev in Israele e con gli etnobotanici Richard S. Felger e Nicholas P. Yensen - che allora lavoravano all'Università dell'Arizona - indi-

University of Arizona

Dan Murphy

Dan Murphy

L'agricoltura basata sull'acqua di mare può richiedere tecniche agronomiche differenti da quelle convenzionali. Per coltivare *Atriplex* - una pianta resistente al sale che può essere usata come alimento per gli animali da allevamento - i campi devono essere inondati frequentemente (*a sinistra*). Inoltre i dispositivi per l'irrigazione (*al centro*) devono essere rivestiti all'interno con tubi di plastica per impedire che arrugginiscano a contatto con l'acqua salata. Altre tecniche, invece, possono rimanere immutate: per esempio, per raccogliere i semi di *Salicornia* (*a destra*) si possono impiegare normali macchine agricole.

viduammo una decina di alofite abbastanza promettenti da essere provate in colture sperimentali su campo.

Nel 1978 cominciammo la valutazione delle piante più promettenti nel deserto costiero di Puerto Peñasco, sulla costa occidentale del Messico. Irrigammo quotidianamente le piante inondando i campi con l'acqua a elevata salinità del Golfo della California. Poiché a Puerto Peñasco cadono in media solo 90 millimetri di pioggia all'anno, eravamo sicuri che le piante riuscissero a crescere solo grazie all'acqua dell'oceano.

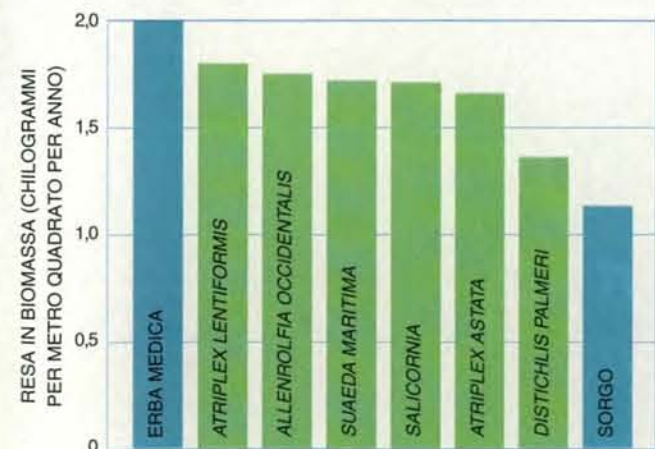
Sebbene le rese variassero da specie a specie, le alofite più produttive hanno fornito 1-2 chilogrammi di biomassa secca per metro quadrato, pari più o meno alla resa dell'erba medica coltivata con sistemi di irrigazione tradizionali. Alcune delle alofite che si sono rivelate più produttive e tolleranti al sale sono specie arbustive di *Salicornia*, *Suaeda* e *Atriplex* della famiglia delle chenopodiacee, che comprende circa il 20 per cento di tutte le specie di alofite. Piante erbacee come *Distichlis* e piante striscianti dalle foglie succulente come *Batis* hanno pure mostrato buona produttività. (Queste piante non sono chenopodiacee, ma fanno parte rispettivamente delle famiglie delle poacee e delle batidacee.)

Ma per soddisfare il primo requisito economico per l'agricoltura basata sull'acqua marina dovevamo dimostrare che le alofite possono sostituire le colture convenzionali per usi specifici. Pertanto abbiamo verificato se queste piante potessero essere utilizzate come cibo per animali. Trovare abbastanza foraggio per le mandrie di bovini e ovini è uno dei più ardui problemi agricoli nelle zone aride di tutto il mondo, il 46 per cento delle quali è stato degradato proprio dall'eccessivo uso a pascolo, secondo quanto afferma l'Environment Program delle Nazioni Unite. Molte alofite contengono elevati livelli di proteine e carboidrati digeribili. Purtroppo, esse contengono anche notevoli quantità di sale; l'accumulo salino è uno dei meccanismi con i quali queste piante si adattano al loro ambiente (*si veda l'illustrazione alle pagine 104-105*). Dato che il sale non è nutriente ma occupa spazio entro le cellule, l'elevato contenuto salino delle alofite riduce il loro valore nutritivo.

L'elevata salinità di queste piante limita anche la quantità che un animale può ingerire; nelle situazioni di pascolo, le alofite sono di solito considerate piante da «ultima spiaggia», quelle che gli animali brucano solamente dopo avere consumato tutta la vegetazione più appetibile.

La nostra strategia è stata quella di incorporare alofite in una dieta mista per il bestiame ovino, sostituendole al normale fieno in modo che costituissero dal 30 al 50 per cento del consumo alimentare quotidiano. (Queste percentuali sono quelle tipiche utilizzate per l'ingrasso degli animali da macellazione.) Abbiamo scoperto che gli ovini a cui era fornito cibo contenente *Salicornia*, *Suaeda* e *Atriplex* guadagnavano peso allo stesso modo di quelli nutriti con il fieno; inoltre la qualità della loro carne non era alterata dal fatto che si alimentavano con una dieta ricca di alofite. Contrariamente ai nostri timori iniziali, gli animali non mostravano alcuna avversione per queste diete miste, e anzi sembravano attratti dal gusto salato; tuttavia, come era prevedibile, essi bevevano più acqua degli animali di controllo, per compensare l'assunzione di sale in eccesso. Oltre a ciò, la quantità di carne prodotta per chilogrammo di cibo era del 10 per cento inferiore a quella di animali nutriti con una dieta convenzionale.

L'alofita più promettente che abbiamo individuato finora è *Salicornia bigelovii*, una succulenta annuale priva di foglie che vive nelle paludi salmastre colonizzando le aree fangose di nuova formazione grazie a una abbondantissima produzione di semi. Questi ultimi contengono elevati livelli di olio (30 per cento) e proteine (35 per cento), esattamente come la soia e altre colture da olio, e il contenuto salino è inferiore al 3 per cento. L'olio è fortemente polinsaturo e simile a quello di girasole per la composizione in acidi grassi. Può essere estratto dai semi e raffinato usando le normali apparecchiature destinate alla produzione olearia ed è perfettamente commestibile, con un piacevole gusto che ricorda la noce. Un piccolo inconveniente è che i semi contengono saponine, composti amari che li rendono inedibili come tali. Esse non contaminano l'olio, ma possono rimanere nella sansa dopo l'estrazione di quest'ultimo. Le saponine limitano perciò la quantità di sansa che può essere usata nell'alimentazione del pollame, ma gli esperimenti hanno dimostrato che la sansa di semi di *Salicornia* può sostituire i convenzionali «pastoni» di semi ai livelli normalmente usati per l'integrazione proteica nelle diete per animali. Pertanto ogni parte della pianta è utilizzabile.

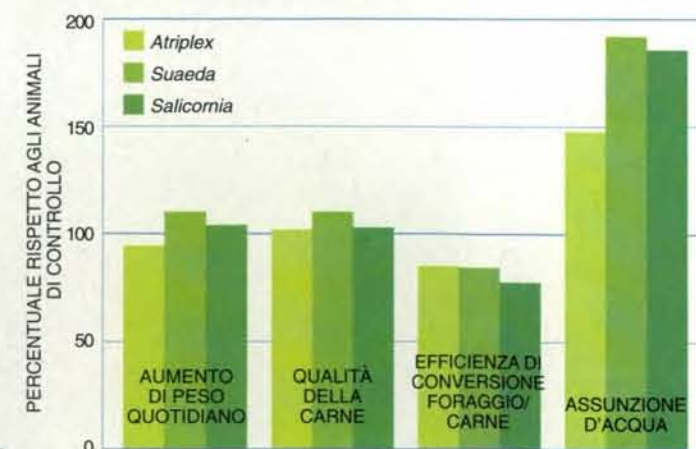
Abbiamo collaborato alla costruzione di diverse fattorie sperimentali, con un'estensione fino a 250 ettari, per la coltivazione di *Salicornia* in Messico, negli Emirati Arabi Uniti, in Arabia Saudita e in India. Nei sei anni di prove sul campo effettuate in Messico, *Salicornia* ha prodotto in media all'anno 1,7 chilogrammi per metro quadrato di biomassa totale e 0,2 chilogrammi per metro quadrato di semi oleosi. Queste rese eguagliano o superano quelle della soia e di altre colture da olio che vengono irrigate in modo convenzionale. Abbiamo anche dimostrato che è possibile modificare le normali macchine agricole e gli apparecchi per l'irrigazione per proteggerli dai danni provocati dal sale contenuto nell'acqua di mare. Sebbene le strategie di irrigazione da utilizzare con l'acqua di mare siano diverse da quelle normalmente usate con l'acqua dolce, non abbiamo incontrato problemi tecnici insormontabili nel passare dalla scala della sperimentazione sul campo a quella del prototipo di fattoria.

Normalmente le colture vengono irrigate solo quando il suolo si asciuga fino al 50 per cento della sua «capacità di campo», ossia la quantità di acqua che è capace di trattenere. Inoltre, con le tecniche di irrigazione tradizionali, si fornisce solo abbastanza acqua per sostituire quella utilizzata dalle piante. Viceversa, l'irrigazione con acqua di mare richiede irrorazioni copiose e frequenti - anche giornaliere - per impedire al sale di accumularsi nella zona delle radici fino a un livello che inibisce la crescita.

Nelle nostre prime sperimentazioni sul campo avevamo usato molta più acqua (20 metri all'anno) di quanto fosse economicamente possibile, sicché nel 1992 cominciammo esperimenti per determinare quale fosse il minimo livello di irrigazione con acqua di mare necessario per ottenere una buona resa. Nel corso di due anni abbiamo fatto crescere piantine di *Salicornia* in «scatole» sepolte all'interno di campi aperti, irrigati, dove era coltivata la stessa pianta. Queste scatole, chiamate lisimetri, erano munite di scarichi sul fondo che trasportavano l'acqua in eccesso a vari punti di raccolta all'esterno del campo, permettendoci di misurare il volume e la salinità dell'acqua di scarico. Con questi dati abbiamo calcolato per la prima volta il bilancio di acqua e sali necessario per una pianta irrigata con acqua marina e abbiamo trovato che la quantità di biomassa prodotta dipende dalla quantità di acqua usata.

Sebbene *Salicornia* possa prosperare anche quando la salinità dell'acqua che ne bagna le radici supera le 100 parti per mille - ossia circa tre volte la normale salinità dell'oceano - la pianta ha bisogno, quando si usa acqua di mare, di un livello di irrigazione all'incirca del 35 per cento superiore rispetto alle colture convenzionali irrigate con acqua dolce. *Salicornia* richiede questa quantità aggiuntiva perché, estraendo selettivamente acqua dall'acqua marina, rende il rimanente troppo salato per l'uso.

Può l'agricoltura basata sull'acqua di mare essere economicamente conveniente? Fra i costi dell'agricoltura irrigua, i più elevati sono dovuti al pompaggio dell'acqua e sono direttamente proporzionali sia alla quantità d'acqua pompata sia all'altezza alla quale viene sollevata. Sebbene le alofite necessitino di più acqua rispetto alle colture convenzionali, le fattorie con irrigazione ad acqua marina situate presso il livello del mare richiedono un minore sollevamento rispetto alle fattorie tradizionali, nelle quali l'acqua è spesso estratta da pozzi profondi oltre 100 metri. Dato che pompare acqua marina al livello del mare è meno costoso che estrarre acqua dolce dai pozzi, questo tipo di agricoltura dovrebbe essere conveniente nelle regioni desertiche, pur fornendo rese minori rispetto all'agricoltura convenzionale.

L'irrigazione con acqua di mare non richiede apparecchiature speciali. Le grandi fattorie sperimentali costruite con il nostro contributo utilizzano la tecnica della sommersione di vaste superfici oppure macchine innaffiatrici a braccio mobile. Queste ultime sono già impiegate in una grande varietà di produzioni agricole. Per usarle con l'acqua di mare, si inserisce un tubo di plastica nel braccio, in modo che il liquido non sia a contatto con il metallo. Inoltre i semi di *Salicornia* sono abbastanza fa-

Slim Films

Le rese delle colture resistenti al sale irrigate con acqua marina sono paragonabili a quelle di due piante irrigate convenzionalmente che vengono spesso usate come foraggio per il bestiame: l'erba medica e il sorgo (*a sinistra*). Gli ovini che hanno consumato, come integratore alla dieta, piante resistenti al sale quali *Atriplex*, *Suaeda* e *Salicornia* guadagnano almeno altrettanto peso e forniscono carne della stessa qualità di animali di controllo nutriti con foraggio di tipo convenzionale, sebbene la conversione da alimento a carne sia meno efficiente e l'assunzione d'acqua quasi doppia (*a destra*).

cili da raccogliere con apparecchiature usuali, purché si abbia l'accortezza di regolarle tenendo conto delle piccole dimensioni dei semi stessi (i quali pesano solo un milligrammo circa).

Tuttavia *Salicornia*, pur essendo finora la nostra coltura di maggiore successo, è tutt'altro che perfetta. Le piante tendono ad appiattirsi sul terreno quando si avvicina il momento del raccolto e i semi vengono a volte liberati prematuramente. Inoltre la percentuale di raccolta dei semi è solo del 75 per cento, rispetto al 90 per cento della maggior parte delle colture. Vi è anche il fatto che, per fornire alte rese in semi, *Salicornia* deve crescere per circa 100 giorni a temperature fresche prima di fiorire. L'attuale produzione di questa pianta è limitata alle zone subtropicali, dove gli inverni sono freschi e le estati calde; tuttavia alcune delle più ampie zone di deserto costiero del mondo si trovano nelle regioni tropicali, più calde.

Il secondo requisito di convenienza economica dell'agricoltura basata sull'acqua di mare è la sostenibilità a lungo termine. Ma non si tratta di un problema limitato a questo tipo di agricoltura: in effetti, molti progetti di irrigazione che impiegano acqua dolce sono tutt'altro che sostenibili. Nelle regioni aride, l'irrigazione con acqua dolce viene spesso praticata in bacini interni dove il deflusso dell'acqua è limitato, il che provoca l'accumulo di sali nella falda sotterranea. Il 20-24 per cento dei terreni irrigati con acqua dolce nel mondo è compromesso dall'accumulo di sale e acqua nella zona delle radici. Quando il problema diventa grave, gli agricoltori sono costretti a installare costosi sistemi sotterranei di drenaggio, e lo smaltimento dell'acqua di scolo così raccolta crea ulteriori grattacapi. Per esempio nella Valle di San Joaquin, in California, l'acqua di scolo finita in una zona umida ha provocato morie e deformità negli uccelli acquatici a causa degli effetti tossici del selenio, un elemento tipicamente presente in molti suoli degli Stati Uniti occidentali e che si era accumulato in alte concentrazioni nell'acqua di scolo.

L'agricoltura basata sull'acqua di mare non è necessariamente esente da questi problemi, ma offre taluni vantaggi. In primo luogo, le aziende agricole situate sui suoli sabbiosi dei deserti costieri di solito possono scaricare senza problemi in mare le proprie acque di scolo. Abbiamo irrigato continuativamente i medesimi appezzamenti con acqua di mare per oltre 10 anni, senza che si sia verificato alcun accumulo di acqua o sali nella zona delle radici. In secondo luogo, gli acquiferi dei deserti salini costieri e interni hanno già un'elevata concentrazione salina e quindi non dovrebbero essere ulteriormente danneggiati dall'acqua di mare. In terzo luogo, i suoli su cui abbiamo proposto di impiantare colture irrigate con acqua marina sono spesso spogli o quasi, cosicché installare un impianto di questo genere potrebbe avere effetti assai minori sugli ecosistemi sensibili di quanti ne abbia l'agricoltura convenzionale.

Nessuna attività agricola, tuttavia, è completamente innocua. Gli stabilimenti di acquacoltura per la produzione di gamberetti, per esempio, hanno causato fioriture algali e problemi sanitari nei fiumi o nelle baie che ricevono i loro effluenti ricchi di sostanze nutritive. Un problema analogo può essere previsto per le coltivazioni a grande scala di alofite, a causa del notevole volume di acque di scolo fortemente saline e contenenti residui di fertilizzanti che alla fine verranno scaricate in mare. D'altra parte, gli effluenti degli impianti di acquacoltura possono essere riciclati per la coltivazione di alofite anziché essere riversati direttamente in mare: le piante assorbirebbero infatti molti degli elementi nutritivi presenti negli effluenti e ne ridurrebbero il volume. La prima fattoria sperimentale per la coltivazione di alofite da noi costruita in Messico è stata installata allo scopo di riciclare gli effluenti di un impianto di acquacoltura, e sono in corso ulteriori ricerche per chiarire la fattibilità di questo tipo di reimpiego.

Varie regioni desertiche costiere e deserti salini interni (*aree in verde*) potrebbero essere usati a scopi agricoli irrigandoli con acqua di mare o con acque sotterranee ad alta salinità per produrre una vasta gamma di piante resistenti al sale, utilizzabili sia per l'alimentazione umana sia come foraggio per il bestiame.

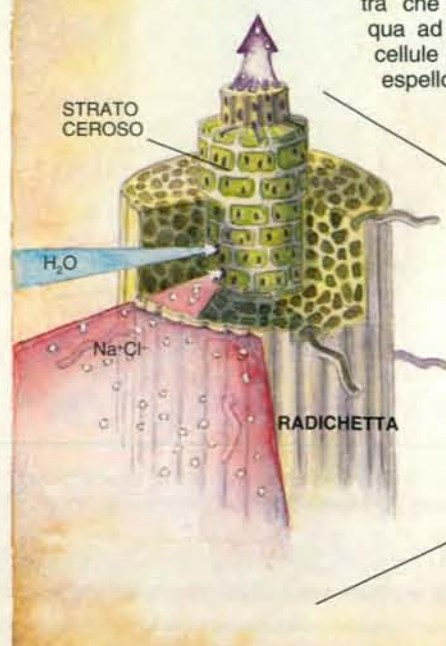
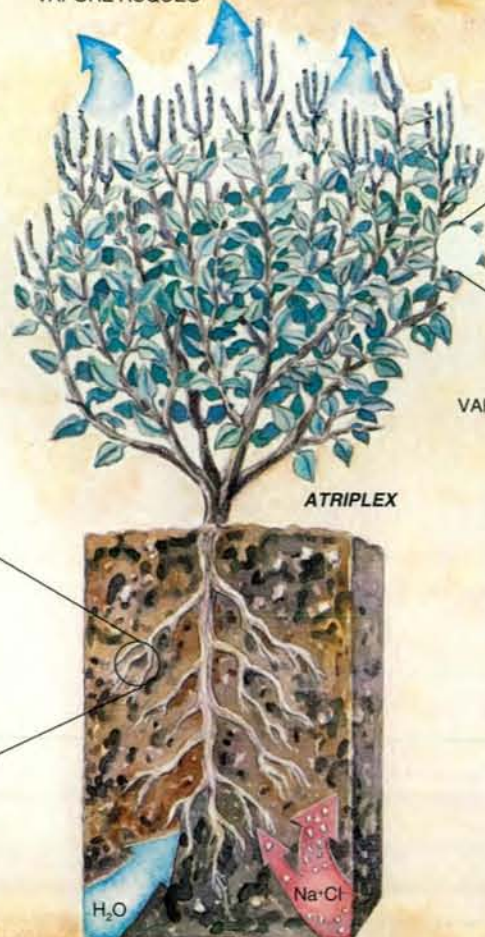
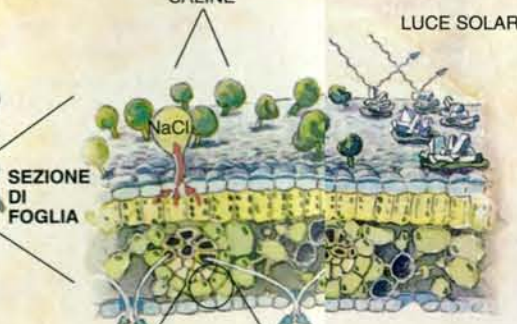
Slim Films

Le coltivazioni di alofite sono state proposte anche come mezzo per riciclare le acque di scolo ricche di selenio prodotte dalle attività agricole nella Valle di San Joaquin. Il selenio è un elemento nutritivo essenziale a bassi livelli, ma diventa tossico in concentrazioni più elevate. Si è visto che le alofite irrigate con queste acque di scolo assorbono abbastanza selenio per renderle utili come integratore alimentare per gli animali, ma non abbastanza da diventare tossiche.

L'agricoltura basata sull'acqua di mare potrà mai essere praticata su grande scala? Il nostro obiettivo alla fine degli anni settanta era quello di accertarne la fattibilità; ci aspettavamo di vedere le prime applicazioni commerciali entro 10 anni. Due decenni dopo, questo tipo di agricoltura è ancora allo stadio preliminare per quanto riguarda lo sviluppo commerciale. Diverse imprese hanno fondato aziende agricole sperimentali che coltivano *Salicornia* o *Atriplex* in California, Messico, Arabia Saudita, Egitto, Pakistan e India; tuttavia, a quanto ci risulta, nessuna di queste imprese è arrivata a raggiungere lo stadio della produzione a grande scala.

La nostra pluriennale esperienza di ricercatori ci ha convinto della praticabilità di questo genere di agricoltura. Tuttavia, l'accettazione di questa alternativa dipenderà in ultima analisi dai futuri fabbisogni alimentari dell'umanità, dalla situazione economica e dal rigore con cui gli ecosistemi di acqua dolce saranno protetti dall'espansione agricola.

Anatomia di una alofita

Certe piante che tollerano il sale, o alofite, hanno evoluto meccanismi a livello delle radici, delle foglie e delle cellule per prosperare in presenza di acqua di mare. Le cellule che compongono lo strato esterno, o epidermide, di ciascuna radichetta sono quasi impermeabili al sale (NaCl). In più, lo strato interno, o endoderma, ha un rivestimento ceroso fra una cellula e l'altra che costringe l'acqua ad attraversare le cellule che filtrano ed espellono il sale.

Alcune alofite, come *Atriplex*, sono dotate di cellule fogliari specializzate, simili a vescicole, dove immagazzinano il cloruro di sodio (NaCl) in eccesso. Quando sono piene, le vescicole esplodono liberando il sale, il quale forma uno strato argenteo che riflette la luce e raffredda la foglia. Il vapore acqueo sfugge dai pori sulla faccia inferiore delle foglie.

All'interno di ciascuna foglia vi sono cellule specialmente adattate per trattare il sale che viene assorbito dalla pianta. Il vacuolo centrale, o zona di immagazzinamento, di ogni cellula contiene molecole che fanno penetrare specificamente ioni sodio (Na^+); gli ioni cloro (Cl^-) seguono questi ultimi. L'alta concentrazione dei due ioni attrae acqua, che mantiene la pressione di turgidità nella cellula.

EDWARD P. GLENN, J. JED BROWN e JAMES W. O'LEARY hanno una pluriennale esperienza nello studio della fattibilità dell'agricoltura basata sull'acqua di mare in ambienti desertici. Sono rispettivamente professore presso il Dipartimento di scienze del suolo, delle acque e dell'ambiente dell'Università dell'Arizona a Tucson; neospecializzato presso il Wildlife and Fisheries Program dell'Università dell'Arizona; e professore al Dipartimento di scienze botaniche dell'Università dell'Arizona.

EPSTEIN EMANUEL e altri, *Saline Culture of Crops: A Genetic Approach* in «Science», 210, 24 ottobre 1980.

Saline Agriculture: Salt Tolerant Plants for Developing Countries, National Academy Press, 1990.

GLENN E. P., O'LEARY J. W., WATSON M. C., THOMPSON T. L. e KUEHL R. O., Salicornia bigelovii *Torr.: An Oilseed Halophyte for Seawater Irrigation* in «Science», 251, 1 marzo 1991.

LIETH H. e AL MASOOM A. A., *Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plants*, serie «Tasks for Vegetation Science» vol. 28, Kluwer Academic Publishers, 1993.

GLENN E. P., *Halophytes* in *Encyclopedia of Environmental Biology*, Academic Press, 1995.